Basiswissen

zum Thema **Kernenergie**

Martin Volkmer

Vollständig überarbeitete Neuauflage 2002
Auflage: 100.000
(Gesamtauflage bisher 1,51 Mio.)
ISBN 3-926956-44-5

Redaktion: Winfried Koelzer (Fachberatung)
Volker Wasgindt (Verantwortlich)
Satz und Layout: Waltraud Zimmer
Druck: UbiaDruckKöln

Herausgeber:



Informationskreis
KernEnergie

Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin

Tel.: 030 498555-30
www.kernenergie.de

Inhalt

1 Das Atom

1.1 Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen

Man kennt zurzeit 114 chemische Elemente (Tab. 1-1). Davon kommen 91 in der Natur vor, die übrigen sind ausschließlich künstlich erzeugt worden.

In der Erdkruste einschließlich Wasser und Luft sind Sauerstoff (49,2 %), Silizium (25,7 %) und Aluminium (7,5 %) die häufigsten Elemente. Der Mensch besteht im Wesentlichen aus Sauerstoff (65 %), Kohlenstoff (18 %) und Wasserstoff (10 %) (Angaben in Gewichtsprozent).

Die kleinsten Teilchen der chemischen Elemente werden Atome genannt. Die kleinsten Teilchen des Wasserstoffs, Kohlenstoffs oder Urans, die noch die charakteristischen Eigenschaften dieser Elemente besitzen, nennt man also Wasserstoffatome, Kohlenstoffatome bzw. Uranatome.

Der Durchmesser der Atome beträgt etwa 10^{-7} mm. Erst 10 Millionen Atome aneinander gereiht ergeben etwa 1 mm. Die Atome sind also für das menschliche Auge unsichtbar. Mit speziellen Mikroskopen ist es aber gelungen, sie schemenhaft zu erkennen. In Abb. 1.1 (Quelle: Bergman/Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, 8. Auflage, Walter de Gruyter, 1987) zeigen die dunklen Flecken die Stellen an, an denen sich die einzelnen Atome eines größeren Moleküls befinden. Über den inneren Aufbau der Atome gibt es keine mikroskopischen Aufnahmen.

Um dennoch eine Vorstellung über den inneren Aufbau zu erhalten, hat man Modelle entwickelt. Es sind anschauliche Bilder, mit denen Beobachtungen und Messergebnisse in übersichtlicher Weise beschrieben und gedeutet werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Modelle immer nur einen Teil der Erfahrungstatsachen beschreiben können. Nach einem im Wesentlichen von Rutherford und Bohr zu Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Modell besteht das Atom aus einem sehr kleinen Kern, in dem fast die gesamte Masse vereinigt ist, und einer Hülle.

Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen (p^+) und elektrisch neutralen Neutronen (n) auf. Sie werden auch als Kernteilchen oder Nukleonen bezeichnet. Die Atome eines jeden Elements haben in ihren Kernen jeweils eine charakteristische Anzahl von Protonen (Tab. 1-1). Jedes Element wird also durch die Protonenzahl eindeutig bestimmt. Bis zum Element Calcium (20 Protonen) stimmt die Protonenzahl etwa mit der Neutronenzahl überein, von da ab überwiegt die Anzahl der Neutronen.

In der Atomhülle befinden sich in der Regel ebenso viel negativ geladene Elektronen (e^-) wie im Kern Protonen vorhanden sind. Da das Elektron eine negative Elementarladung und das Proton eine positive Elementarladung trägt, gleichen sich die Ladungen aus. Das Atom ist dann nach außen elektrisch neutral. Verliert ein Atom ein Elektron aus seiner Hülle, überwiegen die positiven Ladungen im Kern (positives Ion). Nimmt ein Atom ein weiteres Elektron in seine Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen (negatives Ion) (Abb. 1.2).

1.2 Aufbau der Atomhülle und des Atomkerns

Die in einem Kern vorhandenen Protonen müssten sich eigentlich aufgrund ihrer positiven Ladungen gegenseitig abstoßen und dadurch den Kern zum Zerplatzen bringen. Da aber stabile Atomkerne mit z. T. recht vielen Protonen existieren, kann daraus geschlossen werden, dass es andere Kräfte geben muss, die die Kernteilchen aneinander binden. Diese anziehenden Kernkräfte sind stärker als die im Kern wirkenden abstoßenden elektrischen Kräfte.

In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Elektronen. Elektronen und Protonen müssten sich aufgrund ihrer

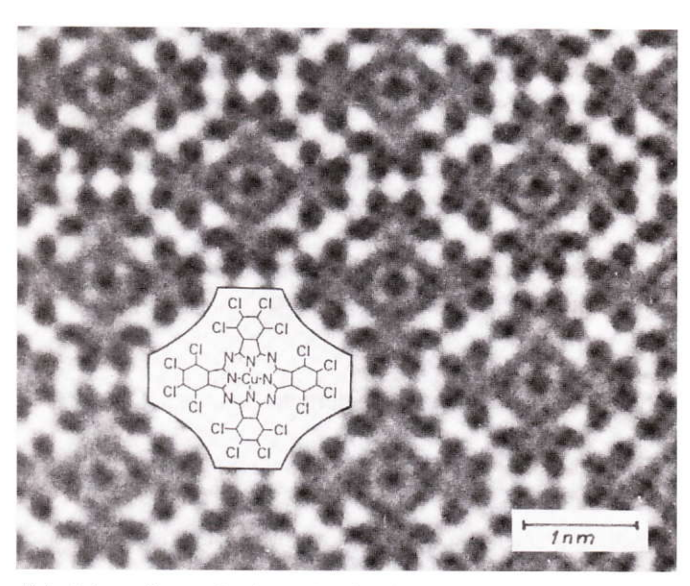


Abb. 1.1: Atome in einem Kupfer-Chlor-Phthalocyanin-Kristall

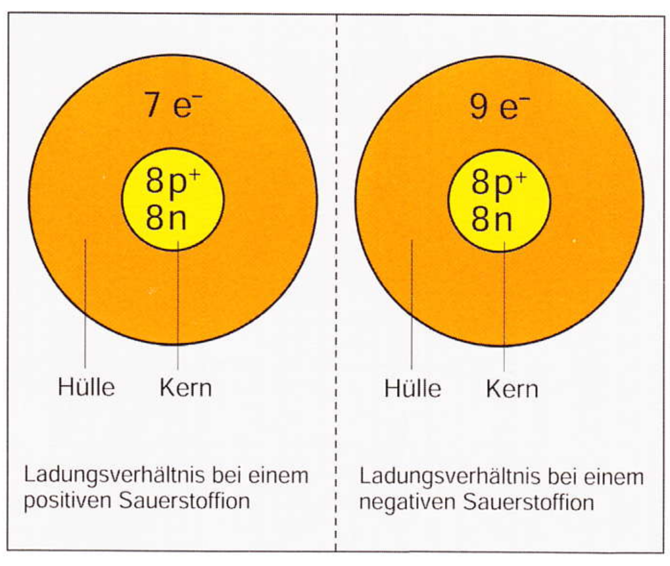


Abb. 1.2: Ladungsverhältnisse bei Ionen (Kerne übertrieben groß dargestellt)

Element	Symbol	Ordnungs-zahl	Element	Symbol	Ordnungs-zahl	Element	Symbol	Ordnungs-zahl
Wasserstoff	H	1	Zirkonium	Zr	40	Gold	Au	79
Helium	He	2	Niob	Nb	41	Quecksilber	Hg	80
Lithium	Li	3	Molybdän	Mo	42	Thallium	Tl	81
Beryllium	Be	4	Technetium	Tc	43*	Blei	Pb	82
Bor	B	5	Ruthenium	Ru	44	Wismut	Bi	83
Kohlenstoff	C	6	Rhodium	Rh	45	Polonium	Po	84
Stickstoff	N	7	Palladium	Pd	46	Astat	At	85
Sauerstoff	O	8	Silber	Ag	47	Radon	Rn	86
Fluor	F	9	Cadmium	Cd	48	Francium	Fr	87
Neon	Ne	10	Indium	In	49	Radium	Ra	88
Natrium	Na	11	Zinn	Sn	50	Actinium	Ac	89
Magnesium	Mg	12	Antimon	Sb	51	Thorium	Th	90
Aluminium	Al	13	Tellur	Te	52	Protactinium	Pa	91
Silizium	Si	14	Iod	I	53	Uran	U	92
Phosphor	P	15	Xenon	Xe	54	Neptunium	Np	93*
Schwefel	S	16	Cäsium	Cs	55	Plutonium	Pu	94
Chlor	Cl	17	Barium	Ba	56	Americium	Am	95*
Argon	Ar	18	Lanthan	La	57	Curium	Cm	96*
Kalium	K	19	Cer	Ce	58	Berkelium	Bk	97*
Calcium	Ca	20	Praseodym	Pr	59	Californium	Cf	98*
Scandium	Sc	21	Neodym	Nd	60	Einsteinium	Es	99*
Titan	Ti	22	Promethium	Pm	61*	Fermium	Fm	100*
Vanadium	V	23	Samarium	Sm	62	Mendelevium	Md	101*
Chrom	Cr	24	Europium	Eu	63	Nobelium	No	102*
Mangan	Mn	25	Gadolinium	Gd	64	Lawrencium	Lw	103*
Eisen	Fe	26	Terbium	Tb	65	Rutherfordium	Rf	104*
Kobalt	Co	27	Dysprosium	Dy	66	Dubnium	Db	105*
Nickel	Ni	28	Holmium	Ho	67	Seaborgium	Sb	106*
Kupfer	Cu	29	Erbium	Er	68	Bohrium	Bh	107*
Zink	Zn	30	Thulium	Tm	69	Hassium	Hs	108*
Gallium	Ga	31	Ytterbium	Yb	70	Meitnerium	Mt	109*
Germanium	Ge	32	Lutetium	Lu	71	noch ohne Namen		110*
Arsen	As	33	Hafnium	Hf	72	noch ohne Namen		111*
Selen	Se	34	Tantal	Ta	73	noch ohne Namen		112*
Brom	Br	35	Wolfram	W	74	noch ohne Namen		114*
Krypton	Kr	36	Rhenium	Re	75	noch ohne Namen		115*
Rubidium	Rb	37	Osmium	Os	76			
Strontium	Sr	38	Iridium	Ir	77	* ausschließlich künstlich erzeugte Elemente		
Yttrium	Y	39	Platin	Pt	78			

Tab. 1-1: Tabelle der chemischen Elemente, nach der Kernladungszahl (Protonenzahl) geordnet

unterschiedlichen elektrischen Ladungen anziehen, die Hüllelektronen also auf den Kern fallen. Da das aber nicht eintritt, ist anzunehmen, dass auch hier andere Kräfte wirksam sind. Sie sorgen dafür, dass Kern und Hülle nicht aufeinander fallen.

Um ein Elektron aus der Atomhülle abzutrennen, benötigt man Energie. Dabei zeigt sich, dass für die einzelnen Elektronen einer Hülle unterschiedlich viel Energie aufgewendet werden muss. Die Elektronen sind also unterschiedlich fest an den Kern gebunden bzw. sie besitzen gegenüber dem Atomkern unterschiedliche Energie. Diese Energiewerte der Elektronen unterscheiden sich aber nicht kontinuierlich, sondern stufenartig voneinander (Energiestufen). Um diese Tatsache im Modell zu veranschaulichen, weist man den einzelnen Elektronen bestimmte Bahnen bzw. Schalen zu, die um den Kern angeordnet sind (K-, L-, M-, N-, O-, P- und Q-Schale, am Kern beginnend) (Abb. 1.3).

Elektronen mit geringerer Energie und damit festerer Bindung an den Kern werden auf kernnahen Bahnen oder Schalen gezeichnet, Elektronen mit größerer Energie und damit weniger fester Bindung an den Kern auf kernferneren Bahnen oder Schalen. Diese Bahnen oder Schalen existieren nicht wirklich. Es sind lediglich Hilfsvorstellungen zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Energiestufen. Das Größenverhältnis von Atomhülle zu Atomkern ist bemerkenswert. Der Durchmesser der Hülle beträgt etwa 10^{-10} m, der Durchmesser des Kerns etwa 10^{-14} m. Der Kern ist also etwa 10 000-mal kleiner als die Hülle. Zur Veranschaulichung dieses Verhältnisses kann man das Atom in Gedanken auf das 10^{12}fache vergrößern. Die Hülle hätte dann einen Durchmesser von 100 m, der Kern wäre aber nur 1 cm groß (Abb. 1.4).

Proton und Neutron haben fast die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt aber nur 1/1836 der Masse des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, dass man ihn bei Betrachtung der Atommassen vernachlässigen kann. Praktisch ist die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt (Tab. 1-2).

Da fast die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt ist, besteht die Materie also überwiegend aus fast leerem Raum. Selbst bei festen Körpern ist nur ein verschwindend kleiner Volumenanteil von Materie erfüllt.

Wenn man die Atome eines großen Ozeandampfers in Gedanken so zusammenpresst, dass sich die Elektronen dicht an den Atomkernen befinden, erhielte man nur eine winzige Menge an Materie in der Größe eines Stecknadelkopfes. Die Masse des Ozeandampfers würde aber erhalten bleiben.

Die Massen von Proton und Neutron liegen im Bereich von 10^{-27} kg. Da das Rechnen mit so kleinen Werten ungünstig ist, gibt man zur Beschreibung der Masse eines Atomkerns lediglich an, wie viel Protonen und Neutronen er enthält. Das ist seine Massenzahl.

Neben der Masse ist die elektrische Ladung die zweite wichtige Eigenschaft des Atomkerns. Jedes Proton besitzt die kleinste bisher nachgewiesene positive Ladungsmenge,

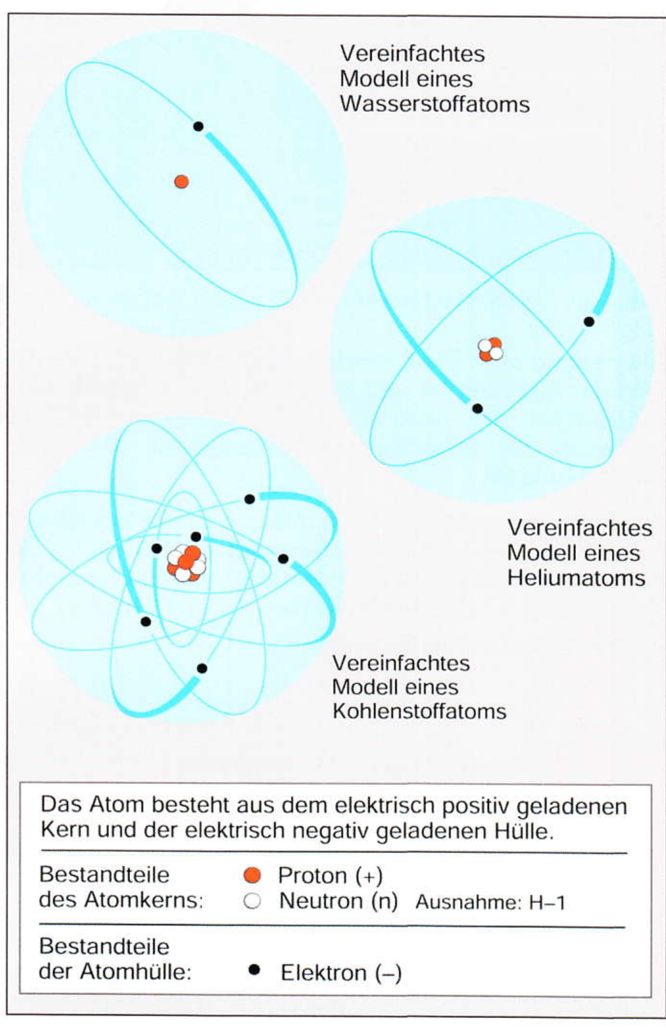


Abb. 1.3: Atome in vereinfachter Modelldarstellung

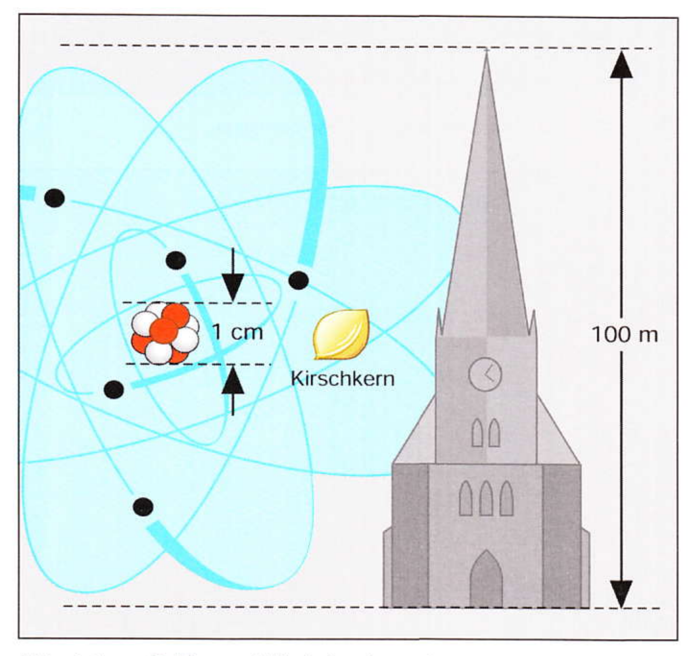


Abb. 1.4: Größenverhältnis in einem Atom
(Atomhülle zu Atomkern wie Kirchturm zu Kirschkern)

Elementarteilchen	Masse (Ruhemasse)		Ladung	
	in kg	in Elektronenmassen	in Coulomb	in Elementarladungen
Elektron	$9{,}10938 \cdot 10^{-31}$	1	$-1{,}6022 \cdot 10^{-19}$	-1
Proton	$1{,}67262 \cdot 10^{-27}$	1836,15	$1{,}6022 \cdot 10^{-19}$	+1
Neutron	$1{,}67493 \cdot 10^{-27}$	1838,68	0	0

Tab. 1-2: Masse und elektrische Ladung der drei wichtigsten Elementarteilchen

die deshalb auch Elementarladung genannt wird. Die Anzahl der Protonen ist also gleich der Anzahl der Elementarladungen. Das wird durch die Kernladungszahl beschrieben. Sie entspricht der Ordnungszahl der chemischen Elemente.

Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl (Anzahl der Protonen und Neutronen) oben links, die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) unten links neben das chemische Symbol gesetzt (Tab. 1-3 und Abb. 1.5).

Für die Elementarteilchen gilt:

$${}^{1}_{1}p \qquad {}^{1}_{0}n \qquad {}^{0}_{-1}e$$

Proton Neutron Elektron

Eine Atomart, die durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisiert ist, wird als Nuklid bezeichnet.

Kern eines Heliumatoms	Kern eines Kohlenstoffatoms	Kern eines Uranatoms
${}^{4}_{2}He$	${}^{12}_{6}C$	${}^{235}_{92}U$
Massenzahl: 4 Kernladungszahl: 2	Massenzahl: 12 Kernladungszahl: 6	Massenzahl: 235 Kernladungszahl: 92

Tab.1-3: Kennzeichnung des Kernaufbaus

Die Atome eines Elements können bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Solche Atome mit gleicher Kernladungszahl (Ordnungszahl), aber mit unterschiedlicher Massenzahl, bezeichnet man als Isotope. Sie unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften.

Da es von jedem der 115 Elemente zahlreiche Isotope gibt, existieren insgesamt rund 2 700 Nuklide. Davon sind 249 stabil, alle anderen zerfallen spontan, d. h. sie sind radioaktiv. Man nennt sie deshalb Radionuklide.

Proton, Neutron und Elektron gehören zu den Elementarteilchen. Es sind kleinste Teilchen, aus denen sich die Materie aufbaut oder die beim radioaktiven Zerfall entstehen, bei der kosmischen Strahlung auftreten bzw. durch Kernreaktionen künstlich erzeugt werden können. Elementarteilchen stellen keine unwandelbaren Gebilde dar, sondern können auf verschiedene Weise umgewandelt, erzeugt und vernichtet werden.

Im natürlichen Wasserstoff treten drei Isotope auf (Abb. 1.6):

99,985 % ${}^{1}_{1}H$ Wasserstoff, leichter Wasserstoff. Der Kern besteht aus einem Proton (${}^{1}_{1}p$).

0,015 % ${}^{2}_{1}H = D$ Schwerer Wasserstoff oder Deuterium (D). Der Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron; er wird auch Deuteron genannt.

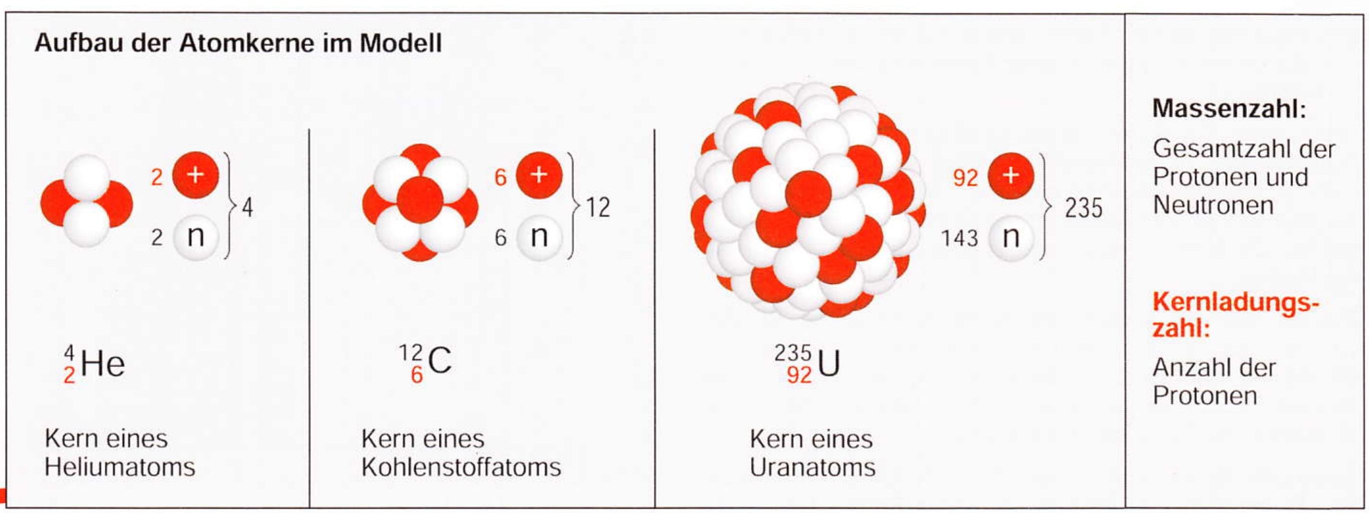


Abb. 1.5: Atomkerne im Modell

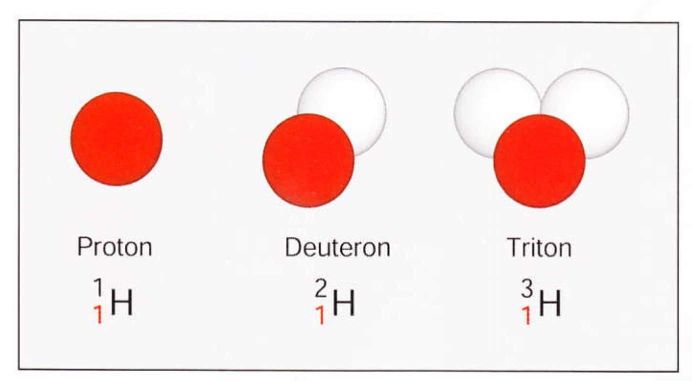


Abb. 1.6: Die Kerne der Wasserstoffisotope (Modelldarstellung)

kleinste Mengen $^{3}_{1}H = T$ Überschwerer Wasserstoff oder Tritium (T). Der Kern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen und heißt Triton.
Tritium wird in den oberen Schichten der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung ständig neu gebildet und entsteht auch in Kernkraftwerken. Tritium ist radioaktiv.

Ein Wassermolekül, das z. B. die Wasserstoffisotope H-1 und H-3 (T) enthält, wird deshalb HTO abgekürzt. Enthält das Molekül nur das Isotop H-2, kürzt man es D_2O ab.

Abb. 1.7 gibt für die ersten zehn Elemente des Periodensystems die Isotope an.

Da die Kernladungszahl für jedes Element festliegt, die Massenzahl aber verschieden sein kann, wird bei einer abgekürzten Schreibweise lediglich die Massenzahl rechts neben den Namen oder das Symbol des betreffenden Elements geschrieben, z. B.: H-3, He-4, C-12, U-235, U-238.

1.3 Eigenschaften der Kernkräfte

In den Atomkernen werden Protonen und Neutronen auf kleinstem Raum zusammengehalten. Das bewirken sehr starke Kernkräfte, die den abstoßenden Kräften zwischen den positiv geladenen Protonen entgegenwirken.

Die Kernkräfte F_K haben eine sehr geringe Reichweite. Erst wenn die Kernteilchen so dicht beieinander liegen, dass sie sich fast berühren, beginnen die Kräfte zu wirken. Es ist so ähnlich wie bei klebrigen Bonbons, die erst aneinander haften, wenn sie sich berühren.

Anzahl der Protonen \ Anzahl der Neutronen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
10							Ne-16	Ne-17 β+	Ne-18 β+	Ne-19 β+	Ne-20 90,48%	Ne-21 0,27%	Ne-22 9,25%	Ne-23 β−	Ne-24 β−	Ne-25 β−	Ne-26 β−	Ne-27 β−	Ne-28 β−
9							F-15	F-16	F-17 β+	F-18 β+	F-19 100%	F-20 β−	F-21 β−	F-22 β−	F-23 β−	F-24 β−	F-25 β−	F-26 β−	F-27
8					O-12	O-13 β+	O-14 β+	O-15 β+	O-16 99,762%	O-17 0,038%	O-18 0,200%	O-19 β−	O-20 β−	O-21 β−	O-22 β−	O-23 β−	O-24 β−		
7						N-12 β+	N-13 β+	N-14 99,634%	N-15 0,366%	N-16 β−	N-17 β−	N-18 β−	N-19 β−	N-20 β−	N-21 β−	N-22 β−	N-23		
6			C-8	C-9 β+	C-10 β+	C-11 β+	C-12 98,90%	C-13 1,10%	C-14 β−	C-15 β−	C-16 β−	C-17 β−	C-18 β−	C-19 β−	C-20 β−		C-22		
5			B-7	B-8 β+	B-9	B-10 19,9%	B-11 80,1%	B-12 β−	B-13 β−	B-14 β−	B-15 β−		B-17 β−		B-19				
4			Be-6	Be-7 ε	Be-8	Be-9 100%	Be-10 β−	Be-11 β−	Be-12 β−		Be-14 β−								
3			Li-5	Li-6 7,5%	Li-7 92,5%	Li-8 β−	Li-9 β−	Li-10	Li-11 β−										
2		He-3 0,000137 %	He-4 99,999863 %	He-5	He-6 β−	He-7	He-8 β−	He-9											
1	H-1 99,985%	H-2 0,015%	H-3 β−																
0		n-1 β−																	

Erklärung der Farben:
Stabiles Nuklid
Beta⁻-Zerfall (β⁻)
Beta⁺-Zerfall (β⁺); Elektroneneinfang (ε)
Alpha-Zerfall *)

*Kommt in diesem Teil der Nuklidkarte nicht vor.

Abb. 1.7: Die Isotope der Elemente mit den Kernladungszahlen 1 bis 10 (Auszug aus der Nuklidkarte)

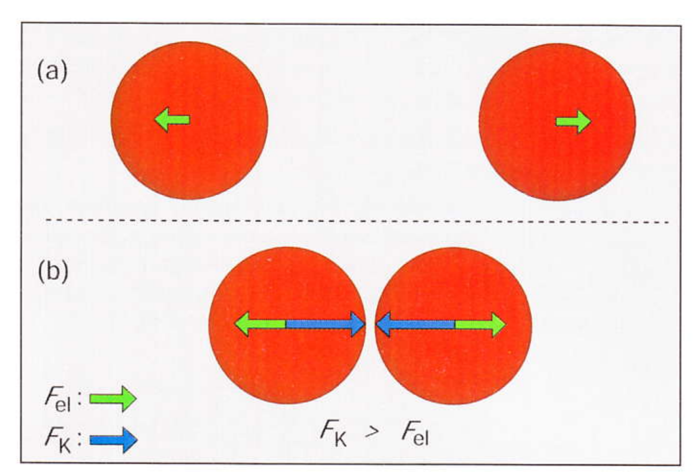


Abb. 1.8: Bei größerer Entfernung zwischen zwei Protonen wirken nur die abstoßenden elektrischen Kräfte (a). Bei geringer Entfernung werden die Kernkräfte wirksam (b). Sie sind stärker als die elektrischen Kräfte.

Die elektrischen Kräfte F_{el}, die zwischen den Protonen wirken, haben im Prinzip eine unendliche Reichweite. Ihre Stärke nimmt jedoch mit der Entfernung r gemäß $1/r^2$ ab (Abb. 1.8).

Wegen der geringen Reichweite werden die Kernkräfte nur zwischen unmittelbar benachbarten Kernteilchen wirksam. Das ist immer nur zwischen einer begrenzten Anzahl von Teilchen der Fall. Besteht ein Atomkern aus nur einigen wenigen Teilchen, ist jedes Teilchen mit jedem anderen in Kontakt, so dass die Kernkräfte wirksam werden können (Abb. 1.9).

Ist die Teilchenzahl größer, kann nicht mehr jedes Kernteilchen über Kernkräfte mit jedem anderen in Wechselwirkung treten. Anders ist es bei den im Kern auftretenden elektrischen Kräften. Sie stoßen sich alle untereinander ab, auch über die Entfernung vieler Kernteilchen hinweg (Abb. 1.10).

Eine weitere Eigenschaft der Kernkräfte ist, dass sie zwischen allen Teilchen wirken, unabhängig von ihrer Ladung. Die Kernkräfte haben also gleiche Größe zwischen den Teilchenpaaren Proton/Proton, Proton/Neutron und Neutron/Neutron.

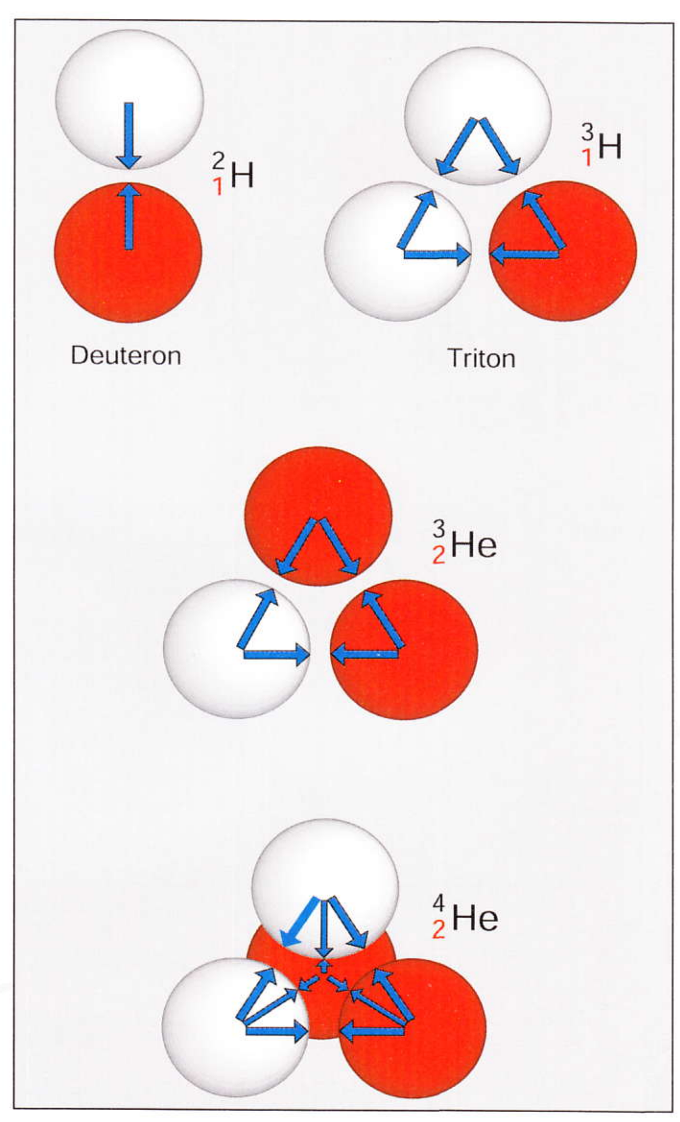


Abb. 1.9: Kernkräfte können nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirken

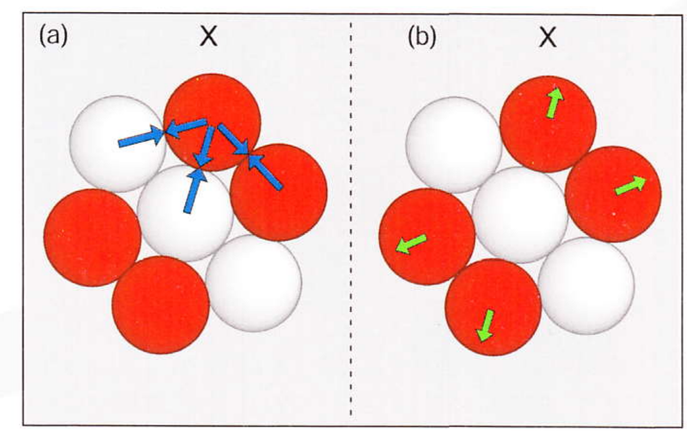


Abb. 1.10: Kernkräfte (blaue Pfeile) und elektrische Kräfte (grüne Pfeile) sind nur für das mit (X) bezeichnete Proton angegeben. „Anziehende" Kernkräfte sind nur zwischen benachbarten Kernteilchen wirksam, „abstoßende" elektrische Kräfte wirken auch über größere Entfernungen.

1.4 Massendefekt und Bindungsenergie

Wie stark die Kernteilchen im Kern zusammengehalten werden, lässt sich berechnen. Das ist am einfachsten am Kern des Heliumatoms darzustellen. Er besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Masse des Kerns müsste sich eigentlich aus zwei Protonenmassen und zwei Neutronenmassen ergeben:

$2 \cdot m_p = 2 \cdot 1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ kg $= 3{,}34524 \cdot 10^{-27}$ kg

$2 \cdot m_n = 2 \cdot 1{,}67493 \cdot 10^{-27}$ kg $= 3{,}34986 \cdot 10^{-27}$ kg

$m_{2p+2n} = 6{,}69510 \cdot 10^{-27}$ kg

Sehr genaue Massenbestimmungen des Heliumkerns haben aber ergeben, dass seine Masse aber m_{He} = 6,644656 · 10^{-27} kg beträgt. Die Masse des Heliumkerns ist also um 0,050444 · 10^{-27} kg geringer als die Summe der Massen der einzeln existierenden Teilchen. Dieser Verlust macht etwa 0,8 % aus (Abb. 1.11).

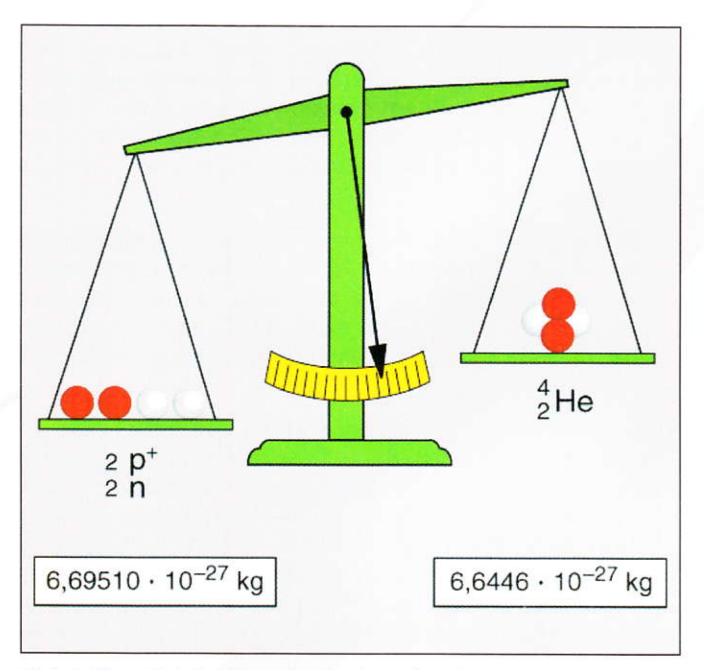


Abb. 1.11: Bei der Entstehung eines Atomkerns aus Nukleonen tritt ein Massenverlust auf

Der Massenverlust (auch Massendefekt genannt) kommt dadurch zustande, dass beim Zusammenschluss von Protonen und Neutronen zu einem Kern ein kleiner Teil ihrer Massen in Energie umgewandelt wird. Diese Energie wird in Form einer unsichtbaren energiereichen Lichtart (Gammastrahlung) abgegeben und tritt auch z. T. als Bewegungsenergie des entstandenen Kerns auf. Würde der Heliumkern wieder in seine Bestandteile zerlegt werden, müsste genau die verloren gegangene Energie dem Kern wieder zugeführt werden. Der Massenverlust (und damit die abgegebene Energie) ist also für das Zusammenhalten der Kernteilchen verantwortlich.

Dass durch Energieabgabe Teilchen zu einer stabilen Einheit zusammengefügt werden können, lässt sich anhand eines mechanischen Modells veranschaulichen (Abb. 1.12).

(a) Vier Kugeln liegen getrennt voneinander auf einer Ebene (indifferentes Gleichgewicht). Sie haben gegenüber der unteren Ebene potenzielle Energie E_{p1} („Höhenenergie"). (Die vier Kugeln entsprechen den zwei Protonen und den zwei Neutronen.)

(b) Fallen die vier Kugeln anschließend in die Vertiefung, liegen sie dicht beieinander im stabilen Gleichgewicht. Da sie nun gegenüber der ursprünglichen Position niedriger liegen, haben sie potenzielle Energie („Höhenenergie") verloren bzw. abgegeben. (Das entspricht der Energieabgabe beim Auftreten der Kernkräfte.)

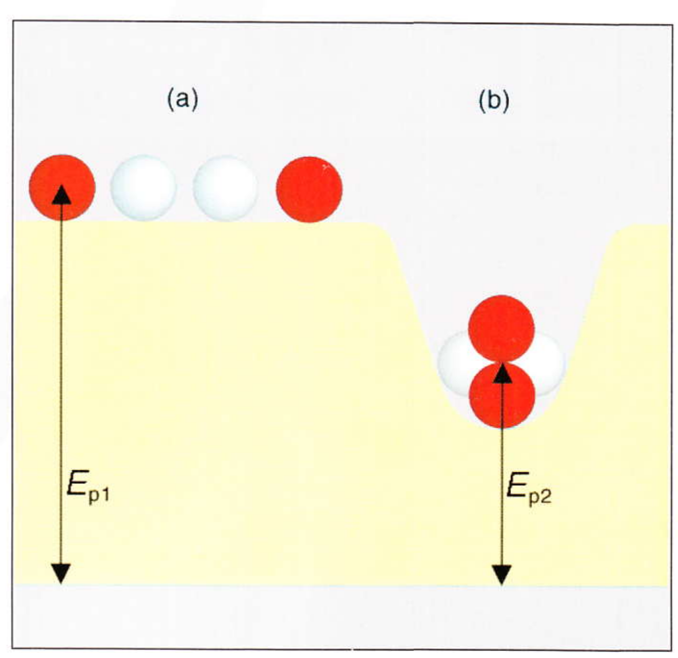


Abb. 1.12: Zusammenfügen von Kugeln zu einer stabileren Einheit durch Energieabgabe (Vergleich zur Entstehung eines Atomkerns aus Kernteilchen)

Wie viel Energie aus einer bestimmten Masse entsteht, kann nach dem von Einstein formulierten Gesetz berechnet werden:

$$E = m \cdot c^2$$

(E: Energie; m: Masse; c: Lichtgeschwindigkeit).

So ergibt 1 kg Masse, die völlig in Energie umgewandelt wird, eine Energie von $E = 9 \cdot 10^{16}$ J. Stünde dieser Betrag als elektrische Energie zur Verfügung, könnte damit die Stadt Hamburg zwei Jahre lang mit elektrischer Energie versorgt werden.

Beim Heliumkern ergibt sich aus dem Massenverlust von $m = 0{,}050444 \cdot 10^{-27}$ kg eine Energie von $E = 0{,}4536 \cdot 10^{-11}$ J = 28,3 MeV (eV: Elektronvolt, 1 eV = 1,60 · 10^{-19} J). Dieser Energiebetrag wurde bei der Kernentstehung abgegeben. Auf jedes einzelne Kernteilchen entfällt dann rechnerisch eine Energie von $E \approx 7{,}1$ MeV.

Je größer bei einer Kernentstehung der Massenverlust und damit die Energieabgabe ist, desto fester sind die Kernteilchen aneinander gebunden. Man nennt diese Energie deshalb auch Bindungsenergie. Genaue Messungen haben ergeben, dass die Bindungsenergie pro Kernteilchen bei den Kernen der einzelnen Elemente bzw. deren Isotopen unterschiedlich ist (Tab. 1-4). Die Bindungsenergie je Nukleon ist in Abb. 1.13 graphisch dargestellt.

Abgesehen von den sehr leichten Atomkernen liegt die Bindungsenergie je Nukleon zwischen 7 MeV und fast 9 MeV. Die Energie, mit der die äußeren Elektronen der Atomhülle gebunden sind, liegt dagegen nur bei 2 bis 3 eV.

Nuklid	Gesamt-Bindungsenergie in MeV	mittlere Bindungsenergie je Nukleon in MeV
H-2	2,225	1,113
He-3	7,7118	2,573
He-4	28,296	7,074
Li-7	39,244	5,606
O-16	127,620	7,976
Cl-35	298,20	8,520
Fe-57	499,90	8,770
Ag-107	915,387	8,555
Lu-176	1 418,40	8,059
Pb-208	1 636,455	7,868
U-235	1 783,889	7,591

Tab. 1-4: Bindungsenergie bei einigen Nukliden

Die mittlere Bindungsenergie je Nukleon hat bei Kernen mit den Massenzahlen 40 bis 100 (z. B. Fe-57, Kr-87) ihren höchsten Wert und nimmt zu den leichteren und den schwereren Kernen hin ab. Für die Nutzung der Kernbindungsenergie stehen also grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Es werden sehr leichte Kerne (z. B. $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H$) miteinander verschmolzen. Daraus entstehen dann schwerere Kerne, deren Kernteilchen stärker aneinander gebunden sind. Das ist mit einem Massenverlust und somit einer Energieabgabe verbunden. Nach diesem Prinzip arbeiten die Energiefreisetzung im Innern der Sonne und der Fusionsreaktor.
- Schwere Kerne werden in mittelschwere gespalten. Da die Bindungsenergie je Nukleon bei mittelschweren Kernen größer ist als bei schweren Kernen, tritt auch dabei Massenverlust und damit Energiefreisetzung auf. Auf diesem Prinzip beruht die Energiegewinnung in Kernkraftwerken.

Dass die Bindung der Nukleonen bei den schweren Kernen lockerer wird, ist darauf zurückzuführen, dass bei Vergrößerung der Nukleonenzahl die Kernkräfte insgesamt zwar zunehmen, aber eben nur zwischen den benachbarten Teilchen wirken. Die abstoßenden Kräfte zwischen den Protonen nehmen ebenfalls zu, sie wirken aber zwischen allen Protonen. Dadurch wird der Zusammenhalt zwischen den Kernteilchen wieder etwas gelockert. Von einer bestimmten Protonenzahl an sind die Kerne nicht mehr stabil, sondern instabil (radioaktiv).

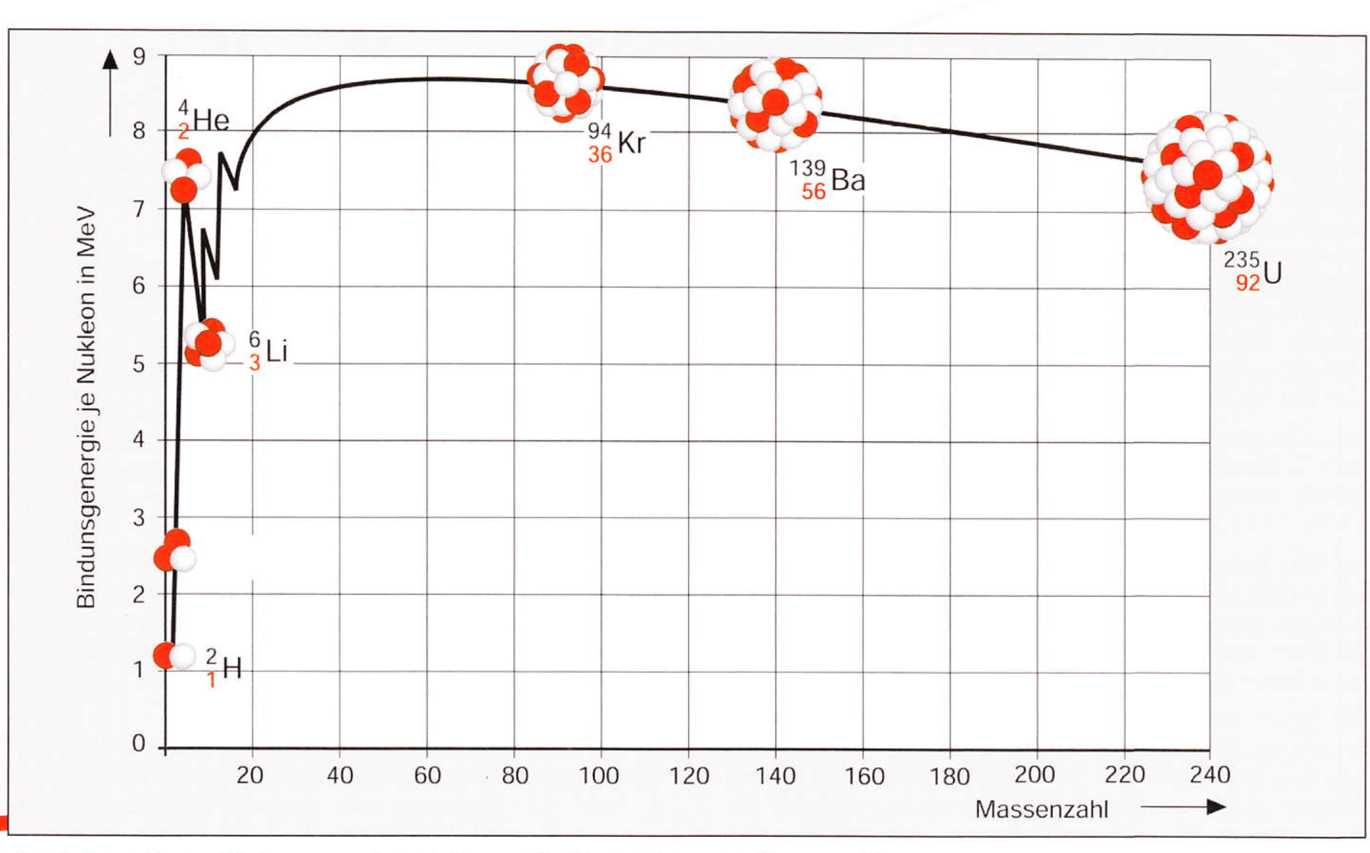


Abb. 1.13: Mittlere Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

2 Kernumwandlungen und Radioaktivität

1896 entdeckte der französische Physiker Antoine Henri Becquerel, dass Uransalze eine unsichtbare Strahlung aussenden, die lichtdicht verpackte Fotoplatten schwärzte und ein geladenes Elektroskop entladen konnte. Die Eheleute Marie und Pierre Curie untersuchten solche Strahlen aussendenden Mineralien genauer. Dabei fanden sie 1898 die Elemente Polonium und das sehr viel stärker strahlende Radium. Im selben Jahr wurde die Strahlung von G. C. Schmidt auch bei Thorium nachgewiesen.

Die neu entdeckten Strahlen ließen sich durch physikalische Einwirkungen auf den strahlenden Stoff oder durch chemische Prozesse nicht beeinflussen. Daraus schloss man, dass die Strahlenaussendung nicht durch chemische Vorgänge verursacht wird. Heute weiß man, dass die Strahlen aus den Kernen instabiler Atome ausgesandt werden. Diese Gesamterscheinung wird Radioaktivität genannt. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide.

Bei den in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität; bei den durch künstliche Kernumwandlung erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität. Von den bisher bekannten über 2 700 verschiedenen Nukliden, die Isotope der 114 chemischen Elemente sind, sind nur 249 stabil, alle anderen zerfallen spontan. Beim Zerfall wird eine „Strahlung" ausgesandt. Nach der Haupteigenschaft der Strahlung, Stoffe zu ionisieren, bezeichnet man sie als ionisierende Strahlung. Die Strahlung entsteht dadurch, dass die Kerne radioaktiver Atome Masse- und Energieportionen mit hoher Geschwindigkeit ausschleudern. Diesen Vorgang nennt man radioaktiven Zerfall.

2.1 Alphastrahlen

Die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne (2 Protonen, 2 Neutronen) werden Alphateilchen genannt (Abb. 2.1). Als Teilchenstrom bilden sie die Alphastrahlen. Die Anfangsgeschwindigkeit der austretenden Alphateilchen beträgt etwa 15 000 km/s.

Der Kern des Radium-226 hat 88 Protonen und 138 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 88, seine Massenzahl 226. Der Kern ist nicht stabil, da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können. Der Kern hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen. Das geschieht in mehreren Stufen, von denen hier nur eine dargestellt ist. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massenzahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Radon (Rn). Dieser Vorgang wird auch Alphazerfall genannt.

Er kann durch eine Kernreaktionsgleichung beschrieben werden:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

In der Gleichung wird links vom Reaktionspfeil der Kernaufbau des Ausgangsatoms, rechts davon das Ergebnis des Zerfalls geschrieben. Dabei müssen auf beiden Seiten die Summe der Kernladungszahlen (86 + 2 = 88) und die Summe der Massenzahlen (222 + 4 = 226) übereinstimmen. Das beim Zerfall entstandene Radon-222 ist ebenfalls radioaktiv und zerfällt weiter. Das entstandene Radon gibt zwei Hüllelektronen an die Umgebung ab. Die ausgesandten Alphateilchen nehmen aus der Umgebung zwei Elektronen auf, wodurch Heliumatome entstehen.

Bei alphastrahlenden Substanzen, die sich in geschlossenen Behältern befinden, kann deshalb nach einiger Zeit Heliumgas nachgewiesen werden. 1 g Radium und seine Folgeprodukte erzeugen in einem Jahr insgesamt 0,156 cm^3 Heliumgas (Angaben bezogen auf 0 °C und Atmosphärendruck). Das entspricht etwa $4{,}29 \cdot 10^{18}$ Heliumatomen.

2.2 Betastrahlen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben. Seine Geschwindigkeit kann zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit liegen. Diese Elektronen bilden dann die Betastrahlen (Abb. 2.2). Das ausgeschleuderte Elektron stammt nicht aus der Atomhülle! Es entsteht, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt.

Reaktionsgleichung: $^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

Beispiel eines Beta⁻-Zerfalls: $^{137}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

Cäsium-137 wandelt sich unter Aussenden eines Elektrons in Barium-137 um.

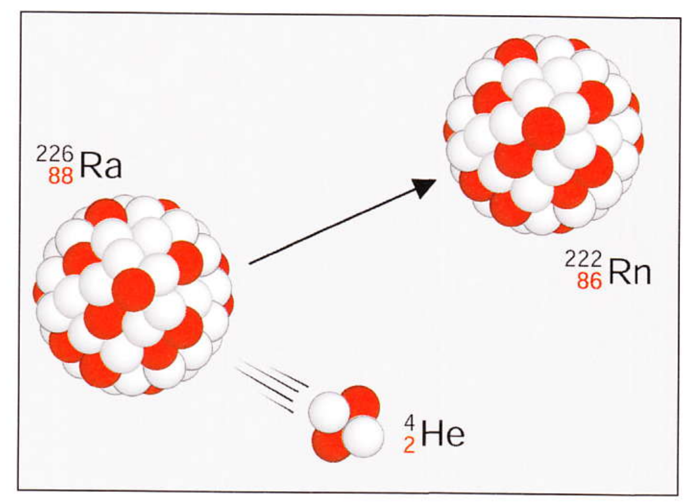


Abb. 2.1: Alphazerfall in Modelldarstellung

Da die Elektronen je eine negative Elementarladung tragen, werden die Strahlen auch als Beta⁻-Strahlen bezeichnet.

Da nach dem Aussenden eines Betateilchens (eines Elektrons) der Kern ein Proton mehr besitzt, muss auch die Kernladungszahl des neu entstandenen Elements um eins höher liegen. Die Anzahl der Kernteilchen hat sich jedoch insgesamt nicht verändert, wodurch die ursprüngliche Massenzahl erhalten bleibt. Beta⁻-Strahlen bilden einen Elektronenstrom, der die gleichen Eigenschaften zeigt wie der elektrische Strom in metallischen Leitern. So erzeugen z. B. beide ein Magnetfeld, das in konzentrischen Kreisen um den Elektronenstrom liegt.

Bei manchen natürlichen und künstlich hergestellten Radionukliden tritt eine Strahlung auf, bei der Teilchen von der Masse eines Elektrons, aber mit einer positiven Ladung ausgeschleudert werden. Es sind Positronen. Die Strahlung wird deshalb Positronenstrahlung oder Beta⁺-Strahlung genannt (Abb. 2.3). Das Positron entsteht im Kern, wenn sich ein Proton in ein Neutron und ein Positron umwandelt.

Reaktionsgleichung: $${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

Beispiel eines Beta⁺-Zerfalls: $${}^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}e$$

Natrium-22 wandelt sich unter Aussenden eines Positrons in Neon-22 um.

Beim Beta⁺-Zerfall nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während sich die Massenzahl nicht verändert.

Beim Betazerfall wird außerdem ein weiteres Teilchen ausgesandt, das keine Ruhemasse und keine elektrische Ladung besitzt. Bei der Umwandlung des Neutrons in ein Proton und ein Elektron entsteht zusätzlich ein Antineutrino, bei der Umwandlung des Protons in ein Neutron und ein Positron entsteht ein Neutrino. Neutrinos und Antineutrinos besitzen ein großes Durchdringungsvermögen, weil sie mit Materie kaum in Wechselwirkung treten. Sie sind deshalb schwer nachzuweisen. (Bei den Kernreaktionsgleichungen werden hier aus Gründen der Vereinfachung Neutrino oder Antineutrino nicht mit angegeben.)

2.3 Gammastrahlen

Bei den Kernumwandlungen kann eine energiereiche Strahlung auftreten, die die gleiche Natur wie das sichtbare Licht hat, nur energiereicher als dieses ist. Sie trägt den Namen Gammastrahlung. Abgesehen von der Art des Entstehens ist sie praktisch identisch mit der Röntgenstrahlung. Die Gammastrahlung wird – wie auch das sichtbare Licht – in einzelnen „Portionen" (Quanten, Photonen) abgegeben (Abb. 2.4).

Die Gammaquanten bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit c_0 = 299 792 458 m/s (Vakuumlichtgeschwindigkeit). Gammastrahlen treten häufig bei Alpha- oder Betazerfall auf. Nach dem Ausschleudern eines Alpha- oder Betateilchens gibt der Atomkern noch vorhandene überschüssige Energie in Form eines oder mehrerer Gammaquanten ab. Durch den Gammazerfall ändert sich der Energieinhalt des Kerns, nicht jedoch dessen Kernladungs- und Massenzahl.

Beispiel: $${}^{137m}_{56}Ba \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \gamma$$

Ein energiereicherer, angeregter (metastabiler) Bariumkern gibt ein Gammaquant ab und geht dadurch in einen niedrigeren und gleichzeitig stabileren Energiezustand über.

Gammaquanten treten außer bei Kernumwandlungen auch noch bei anderen Reaktionen zwischen Elementarteilchen (Bausteinen des Atoms) auf.

137/55 Cs
137/56 Ba
e⁻
Beta⁻ -Teilchen
(Elektron)
p⁺
n
e⁻

Abb. 2.2: Modell zur Entstehung der Beta⁻-Strahlen

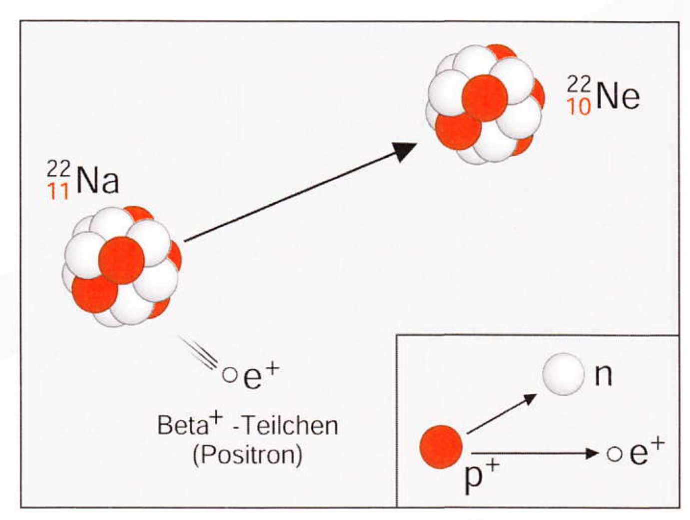


Abb. 2.3: Modell zur Entstehung der Beta⁺-Strahlen

2.4 Der Elektroneneinfang

Bei natürlichen und künstlich erzeugten Radionukliden kann noch eine weitere Umwandlungsart auftreten, der so genannte Elektroneneinfang. Der Kern eines neutronenarmen Atoms fängt meist aus der innersten Schale der Elektronenhülle – der K-Schale, daher auch der Name K-Einfang – ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (Abb. 2.5). Der in der Atomhülle frei gewordene Platz wird von einem äußeren Elektron wieder aufgefüllt. Dabei entsteht eine charakteristische Röntgenstrahlung.

Reaktionsgleichung: $${}^{1}_{1}\mathrm{p} + {}^{\;0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Beispiel: $${}^{40}_{19}\mathrm{K} + {}^{\;0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{40}_{18}\mathrm{Ar}$$

Das in der Natur vorkommende Isotop Kalium-40 wandelt sich zum Teil unter Elektroneneinfang in das Isotop Argon-40 um. Beim Elektroneneinfang nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während die Massenzahl unverändert bleibt. Der Elektroneneinfang führt also zu dem gleichen Ergebnis wie die Abgabe eines Positrons.

2.5 Protonen- und Neutronenstrahlen

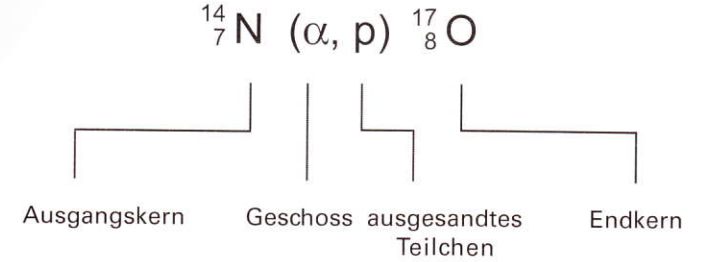
Die erste künstliche Kernumwandlung wurde in einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer beobachtet. Aus den Untersuchungen ergab sich folgende Erklärung: Ein Alphateilchen (Heliumkern) dringt in den Kern eines Stickstoffatoms ein und verschmilzt mit ihm für kurze Zeit zu einem hochangeregten Zwischenkern des Elements Fluor. Der Fluorkern zerfällt in einen Sauerstoffkern und ein Proton (Abb. 2.6).

Kernreaktionsgleichung:

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{p}$$

Bei Kernreaktionen wird auch die folgende abgekürzte Schreibweise benutzt:

$${}^{14}_{7}\mathrm{N}\ (\alpha, \mathrm{p})\ {}^{17}_{8}\mathrm{O}$$



Nach der Kernreaktion erfolgt ein Elektronenausgleich, d. h. es werden aus der Umgebung so viele Elektronen aufgenommen (oder in anderen Fällen an sie abgegeben), dass die beteiligten Atome wieder elektrisch neutral sind.

Werden Neutronen aus einem Atomkern herausgeschlagen oder herausgeschleudert, entsteht dadurch eine Neutronenstrahlung. Das kann z. B. in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Zusammenprall der kosmischen Primärteilchen mit den Luftmolekülen geschehen oder bei Kernspaltungen in einem Kernkraftwerk. Der Nachweis freier Neutronen gelang erstmals dem Engländer

Abb. 2.4: Emission eines Gamma-Quants aus einem angeregten Kern in Modelldarstellung

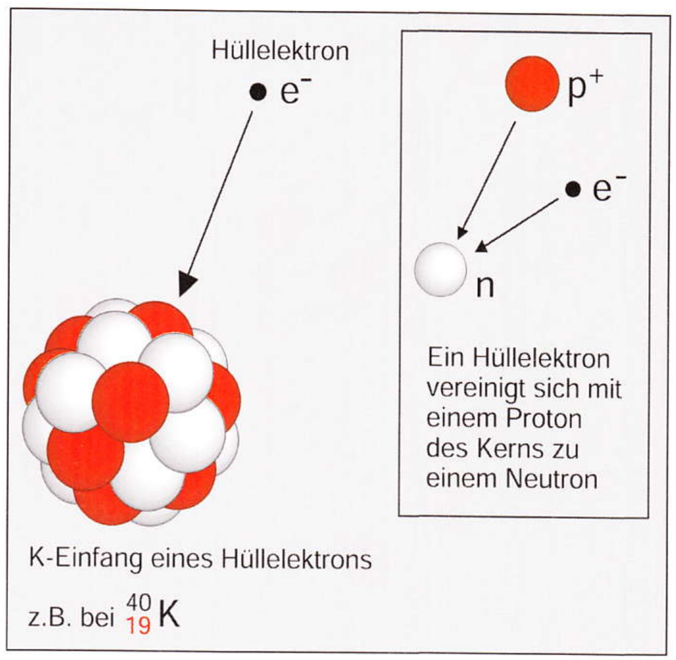


Abb. 2.5: K-Einfang in Modelldarstellung

Chadwick 1932 beim Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen (Abb. 2.7).

Kernreaktionsgleichung:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{13}_{6}\mathrm{C} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n} + \gamma$$

Ein freies Neutron ist radioaktiv. Es zerfällt in ein Proton und ein Elektron sowie ein Antineutrino (in der Reaktionsgleichung weggelassen).

Reaktionsgleichung: $$^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{1}_{1}\mathrm{p} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

Ein im Kern gebundenes Neutron ist dagegen stabil und zerfällt nicht. Eine Ausnahme bildet der Beta$^-$-Zerfall.

2.6 Halbwertszeit

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder erst in Tausenden von Jahren zerfallen. Bei einer großen Anzahl von Atomen lässt sich aber eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den Ablauf des Zerfalls machen. Es zerfällt zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff-3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw.

Kernreaktionsgleichung:

$$^{3}_{1}\mathrm{He} \rightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit ($T_{1/2}$) genannt. Sie ist für jedes Radionuklid eine charakteristische Größe (Abb. 2.8).

Die Halbwertszeiten liegen zwischen vielen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (siehe Tab. 2-1 und Tab. 2-2). Die größte Halbwertszeit, die bisher nachgewiesen worden ist, besitzt Tellur-128 ($T_{1/2}$ = 7,2 · 10^{24} a), die kleinste Halbwertszeit Radium-216m ($T_{1/2}$ = 7 · 10^{-9} s = 7 ns).

Abb. 2.6: Nachweis freier Protonen durch Rutherford (1919) in Modelldarstellung

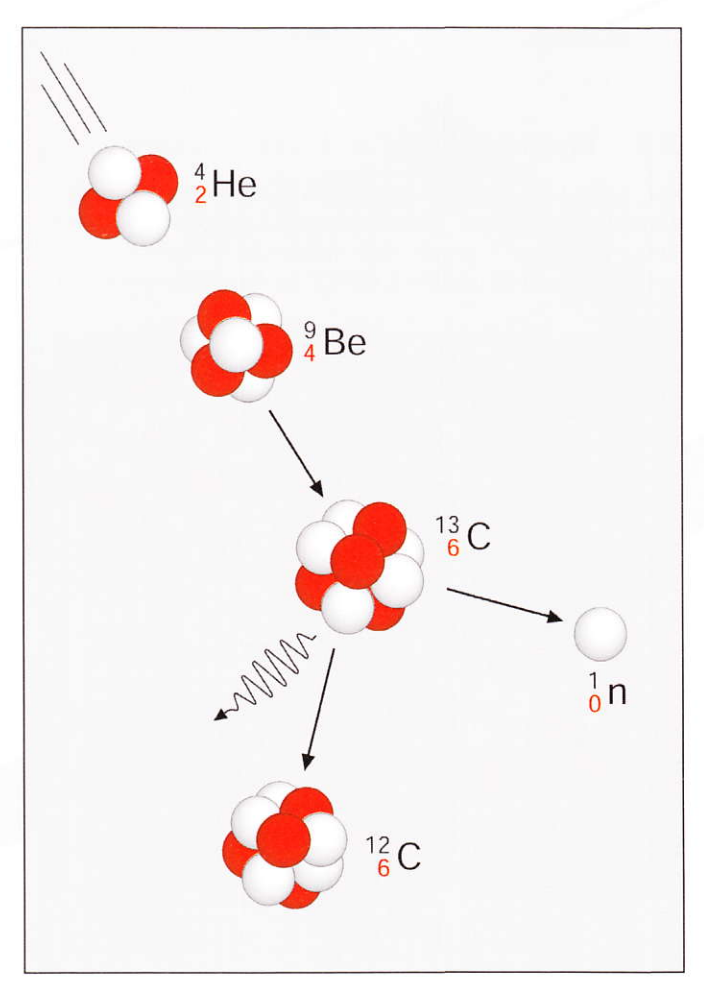


Abb. 2.7: Nachweis freier Neutronen durch Chadwick (1932) in Modelldarstellung

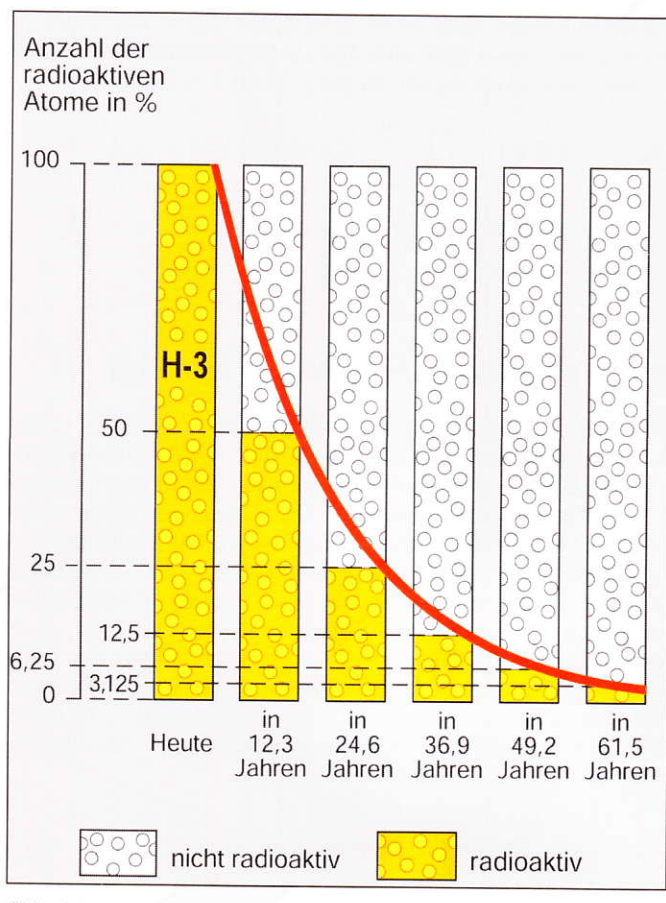


Abb. 2.8: Abklingen der Aktivität bei Tritium (Wasserstoff-3)

Bei einer angenommenen Anzahl von 12 000 000 radioaktiven Atomkernen kann man sich den Ablauf des Zerfalls anhand einer Auflistung (Tab. 2-3) deutlich machen. Als Radionuklid ist auch hier wieder Wasserstoff-3 (Tritium) gewählt worden. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 12,3 a unter Aussenden eines Betateilchens zu dem nicht mehr radioaktiven Heliumisotop He-3 (Abb. 2.9).

Die Auflistung (Tab. 2-3) lässt Folgendes erkennen:

- In jeder Halbwertszeit wandelt sich stets die Hälfte der jeweils zu Beginn noch vorhandenen radioaktiven Atomkerne um.
- Die Anzahl der radioaktiven Kerne nimmt erst schnell, dann immer langsamer ab. Die Anzahl der nicht mehr radioaktiven Kerne nimmt erst schnell, dann immer langsamer zu.
- Nach vier Halbwertszeiten ist das Radionuklid zu mehr als 90 % zerfallen, nach zehn Halbwertszeiten zu mehr als 99,9 %.

Wird die Anzahl der zu Beginn eines Zerfalls vorhandenen radioaktiven Kerne mit N_0, die am Ende der Abklingzeit t noch vorhandenen Kerne mit N_t und die Halbwertszeit mit $T_{1/2}$ bezeichnet, so ergibt sich die Anzahl dann noch radioaktiver Kerne nach der Gleichung:

$$N_t = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart
H-3	12,323 a	Beta-Minus
C-14	$5{,}730 \cdot 10^3$ a	Beta-Minus
K-40	$1{,}28 \cdot 10^9$ a	Beta-Minus, K-Einfang
Te-128	$7{,}2 \cdot 10^{24}$ a	Beta-Minus
Bi-214	19,9 min	Alpha, Beta-Minus
Po-210	138,38 d	Alpha
Po-214	$1{,}6410^{-4}$ s	Alpha
Rn-222	3,825 d	Alpha
Ra-226	$1{,}6 \cdot 10^3$ a	Alpha
Th-232	$1{,}405 \cdot 10^{10}$ a	Alpha
U-235	$7{,}038 \cdot 10^8$ a	Alpha
U-238	$4{,}468 \cdot 10^9$ a	Alpha

(a: Jahr; d: Tag; min: Minute; s: Sekunde)

Tab. 2-1: Beispiele für natürliche Radionuklide und ihre Halbwertszeiten

Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart
H-3	12,323 a	Beta-Minus
Kr-85	10,76 a	Beta-Minus
Sr-90	28,64 a	Beta-Minus
Te-132	76,3 h	Beta-Minus
I-131	8,02 d	Beta-Minus
Cs-134	2,06 a	Beta-Minus
Cs-135	$2 \cdot 10^6$ a	Beta-Minus
Cs-137	30,17 a	Beta-Minus
Ba-140	12,75 d	Beta-Minus
La-147	4,0 s	Beta-Minus
Pu-239	$2{,}411 \cdot 10^4$ a	Alpha
Cm-242	162,94 d	Alpha

(a: Jahr; d: Tag; h: Stunde; s: Sekunde)

Tab. 2-2: Beispiele für künstlich erzeugte Radionuklide und ihre Halbwertszeiten

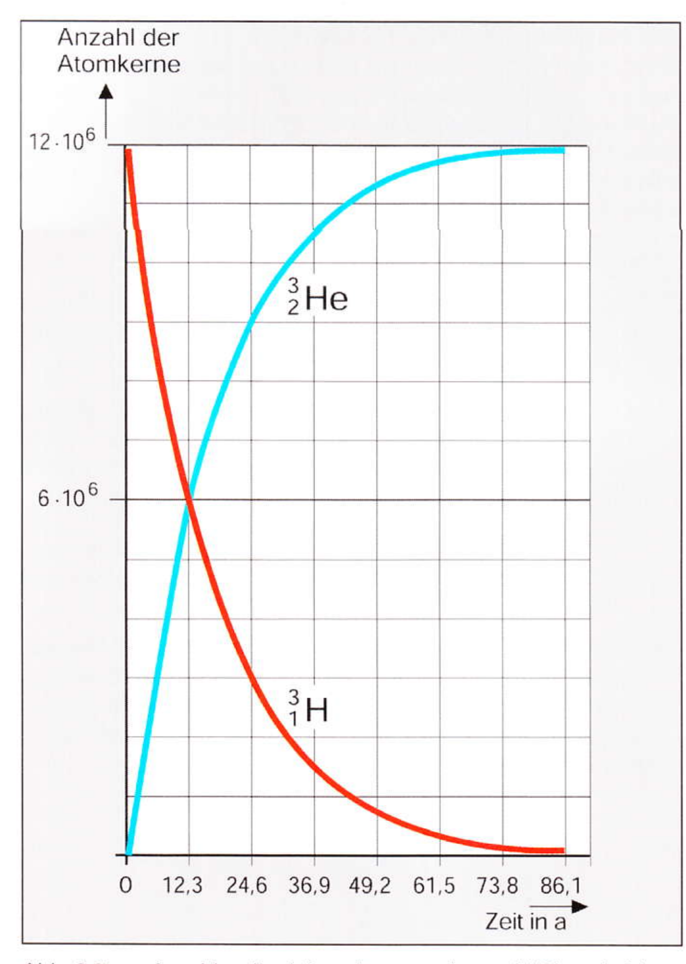


Abb. 2.9: Anzahl radioaktiver Ausgangskerne (H-3) und nicht mehr radioaktiver Tochterkerne (He-3) in Abhängigkeit von der Zeit

Zeit in Jahren	Anzahl der abgelaufenen Halbwertszeiten	Anzahl der radioaktiven Kerne	Anzahl der nicht mehr radioaktiven Tochterkerne
0	0	12 000 000 (100 %)	0 (0 %)
12,3	1	6 000 000 (50 %)	6 000 000 (50 %)
24,6	2	3 000 000 (25 %)	9 000 000 (75 %)
36,9	3	1 500 000 (12,5 %)	10 500 000 (87,5 %)
49,2	4	750 000 (6,25 %)	11 250 000 (93,75 %)
61,5	5	375 000 (ca. 3,12 %)	11 625 000 (96,88 %)
73,8	6	187 500 (ca. 1,56 %)	11 812 500 (98,44 %)
86,1	7	93 750 (ca. 0,78 %)	11 906 250 (99,22 %)
98,4	8	46 875 (ca. 0,39 %)	11 953 125 (99,61 %)
110,7	9	23 438 (ca. 0,20 %)	11 976 562 (99,80 %)
123	10	11 719 (ca. 0,10 %)	11 988 281 (99,90 %)

Tab. 2-3: Zahlenmäßige Beschreibung des radioaktiven Zerfalls bei H-3

Rechenbeispiel: Wie viele radioaktive Kerne des Wasserstoff-3 sind nach 98,4 Jahren (acht Halbwertszeiten) noch vorhanden, wenn es am Anfang 12 000 000 waren?

$$N_t = 12\,000\,000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{98,4}{12,3}} = 12\,000\,000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{8} =$$

$$12\,000\,000 \cdot \left(\frac{1}{256}\right) = 46\,875$$

2.7 Aktivität und spezifische Aktivität

Die Zeit, in der die Hälfte einer großen Anzahl von radioaktiven Atomkernen sich umwandelt, wird Halbwertszeit genannt. Sie hat für jedes Radionuklid einen charakteristischen Wert. Für den Umgang mit radioaktiven Substanzen ist es aber oftmals wichtiger zu wissen, wie viel radioaktive Atomkerne sich in einer bestimmten Zeit umwandeln (z. B. in 1 Sekunde). Beim Vergleich mehrerer Substanzen weiß man dann, welche Substanz stärker aktiv ist, d. h. in welcher Substanz mehr Kernumwandlungen pro Zeiteinheit stattfinden. Zur Beschreibung dieses Sachverhaltes hat man die Aktivität oder Zerfallsrate festgelegt. Sie gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeiteinheit an:

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}} \quad ; A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Anzahl der Kernumwandlungen wird als Zahlenwert ohne Einheit angegeben. Für die Zeit wird als Einheit die Sekunde gewählt. Die Einheit der Aktivität ist also $1/s = s^{-1}$ (reziproke Sekunde). Als besonderer Einheitenname für die Aktivität wurde das Becquerel (Bq) eingeführt:

$$1\ \text{Bq} = 1 \cdot s^{-1}$$

Die Zahlenangabe in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen pro Sekunde an. In Abb. 2.10 wird davon ausgegangen, dass in einer bestimmten Menge radioaktiver Atome (nur die Atomkerne sind in der Abbildung dargestellt) in 4 s vier Kernumwandlungen stattfinden. Die Aktivität beträgt dann:

$$A = \frac{4}{4\ s} = \frac{1}{1\ s} = 1 \cdot s^{-1} = 1\ \text{Bq}$$

Bei zehn Kernumwandlungen pro Sekunde ergibt sich eine Aktivität von 10 Bq, bei 1 000 Kernumwandlungen pro Sekunde eine Aktivität von 1 000 Bq = 1 kBq.

Viele Radionuklide bilden nach ihrer Umwandlung Tochterkerne, die wiederum radioaktiv sind. So wandelt sich z. B. Ra-226 in das radioaktive Edelgas Rn-222 um. Aktivitätsangaben für ein Radionuklid beziehen sich aber immer auf die Ausgangssubstanz, nicht auf die angesammelten Folgeprodukte.

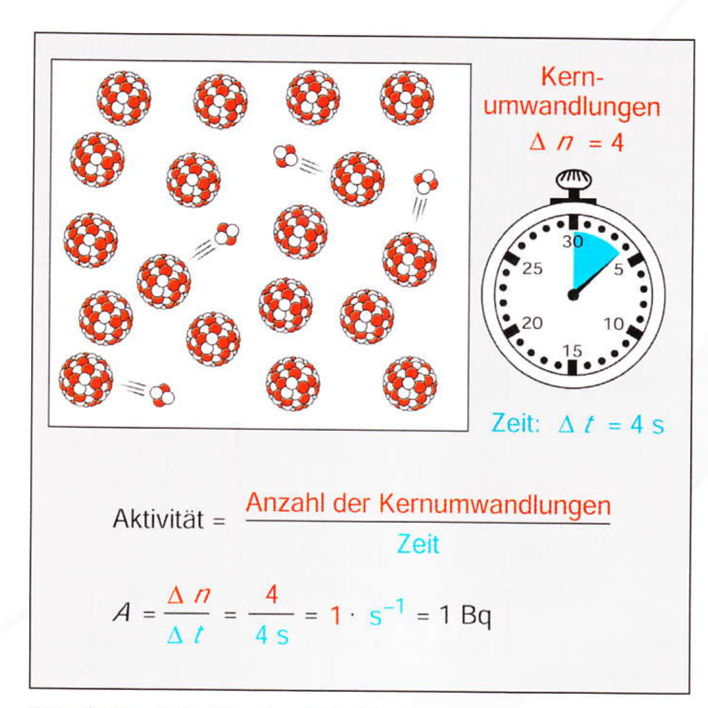


Abb. 2.10: Definition der Aktivität

Abgeleitete Aktivitätseinheiten:

- Spezifische Aktivität (Bq/kg, Bq/g usw.) (Tab. 2-4), In Abb. 2.11 wird davon ausgegangen, dass in einer Masse von 1 kg acht Kernumwandlungen in 1 s stattfinden. Die spezifische Aktivität beträgt dann 8 Bq/kg.
- Aktivitätskonzentration (Bq/m^3, Bq/l usw.)
- Flächenaktivität (Bq/m^2, Bq/cm^2 usw.)

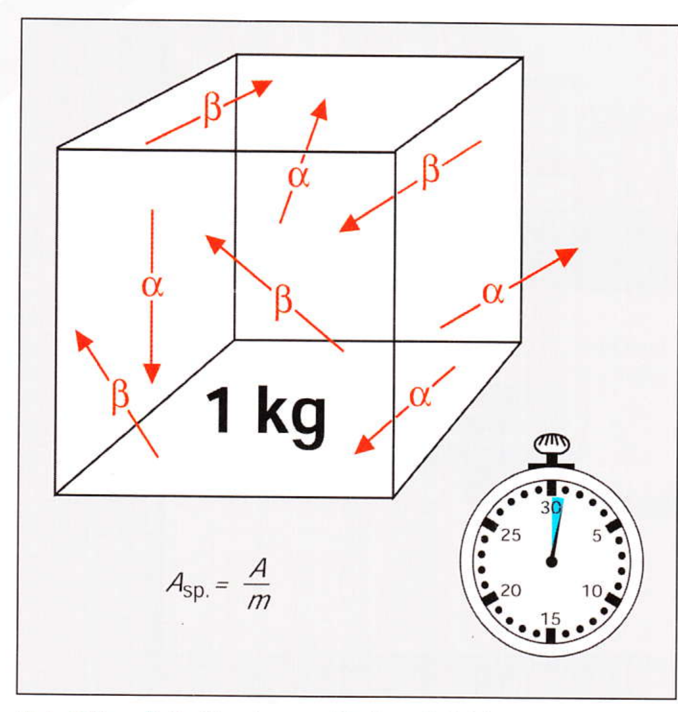


Abb. 2.11: Definition der spezifischen Aktivität

Radionuklid	spezifische Aktivität in Bq/g
H-3	$3{,}6 \cdot 10^{14}$
C-14	$1{,}7 \cdot 10^{11}$
K-nat (K-40)	$3{,}0 \cdot 10^{1}$
Fe-59	$1{,}8 \cdot 10^{15}$
Co-60	$4{,}1 \cdot 10^{13}$
Kr-85	$1{,}4 \cdot 10^{13}$
Sr-90	$5{,}3 \cdot 10^{12}$
I-131	$4{,}6 \cdot 10^{15}$
Xe-133	$6{,}8 \cdot 10^{15}$
Cs-134	$4{,}8 \cdot 10^{13}$
Cs-137	$3{,}2 \cdot 10^{12}$
U-nat	$2{,}5 \cdot 10^{4}$
Pu-239	$2{,}3 \cdot 10^{9}$

Tab. 2-4: Spezifische Aktivität einiger Radionuklide (gerundet)

- Aktivitätsrate: Bildung, Zufuhr oder Abgabe von Aktivität pro Zeitintervall (Bq/a, Bq/h, Bq/s usw.)

Bis Ende 1985 durfte im amtlichen Verkehr noch die Einheit Curie (Ci) verwendet werden. Für die Umrechnung gilt:

1 Curie	(Ci)	=	10^{0} Ci	=	$3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
1 Millicurie	(mCi)	=	10^{-3} Ci	=	$3{,}7 \cdot 10^{7}$ Bq
1 Mikrocurie	(μCi)	=	10^{-6} Ci	=	$3{,}7 \cdot 10^{4}$ Bq
1 Nanocurie	(nCi)	=	10^{-9} Ci	=	$3{,}7 \cdot 10^{1}$ Bq
1 Pikocurie	(pCi)	=	10^{-12} Ci	=	$3{,}7 \cdot 10^{-2}$ Bq

3 Das Wesen der Energie

3.1 Energiearten und Energieumwandlungen

Um Lasten hochzuheben, Maschinen anzutreiben, Werkstücke zu verformen, elektrische Geräte zu betreiben sowie zum Erwärmen und Beleuchten benötigt man Energie. Sie muss den Geräten und Maschinen zugeführt werden, wenn sie die gewünschten Arbeiten verrichten sollen. Energie kommt in verschiedenen Formen vor, als Bewegungsenergie, potenzielle Energie (Lageenergie, Spannenergie), Wärmeenergie, Lichtenergie, elektrische Energie, chemische Energie und Kernenergie. So wird z. B. zum Antrieb eines Autos die chemische Energie des Treibstoffes eingesetzt, bei einem Wasserkraftwerk die potenzielle Energie des gestauten Wassers, bei einem Windkraftwerk die Bewegungsenergie des Windes, beim Generator eines Kernkraftwerkes die Kernenergie und zum Erwärmen einer Kochplatte elektrische Energie.

Wenn mit Hilfe von Energie eine Arbeit verrichtet wird, wandelt sich immer die zugeführte Energie in eine andere Energieform um. Es gilt nämlich allgemein, dass Energie nicht vernichtet und nicht neu geschaffen werden kann. Man vermag lediglich eine Energieform in eine andere umzuwandeln. Dabei entstehen aber stets Verluste. Nur ein Teil wird in eine neue, nutzbare Energieform, ein anderer Teil in eine nicht oder nur schwer nutzbare Energieform umgewandelt. Z. B. wandelt ein Elektromotor die zugeführte elektrische Energie nicht nur in nutzbare Bewegungsenergie, sondern zu einem kleinen Teil auch in nicht nutzbare Wärmeenergie um. Man merkt es daran, dass sich der Motor beim Betrieb erwärmt.

Wie groß bei Energieumwandlungen der Anteil nutzbarer Energie ist, wird durch den Wirkungsgrad η ausgedrückt (η: griechischer Buchstabe „eta“). Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als 1.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{nutzbare Energie}}{\text{aufgewendete Energie}} \quad ; \quad \eta = \frac{E_2}{E_1}$$

3.2 Energieumwandlungen bei Kohlekraftwerk und Kernkraftwerk

Bei großen technischen Anlagen finden meist mehrere Energieumwandlungen statt, so dass sich eine Umwandlungsreihe bzw. Umwandlungskette ergibt. Zwischen Ausgangs- und Endenergie treten dann weitere Energieformen auf. Bei einem Kohlekraftwerk sind es vier Energieumwandlungsstufen (Abb. 3.1):

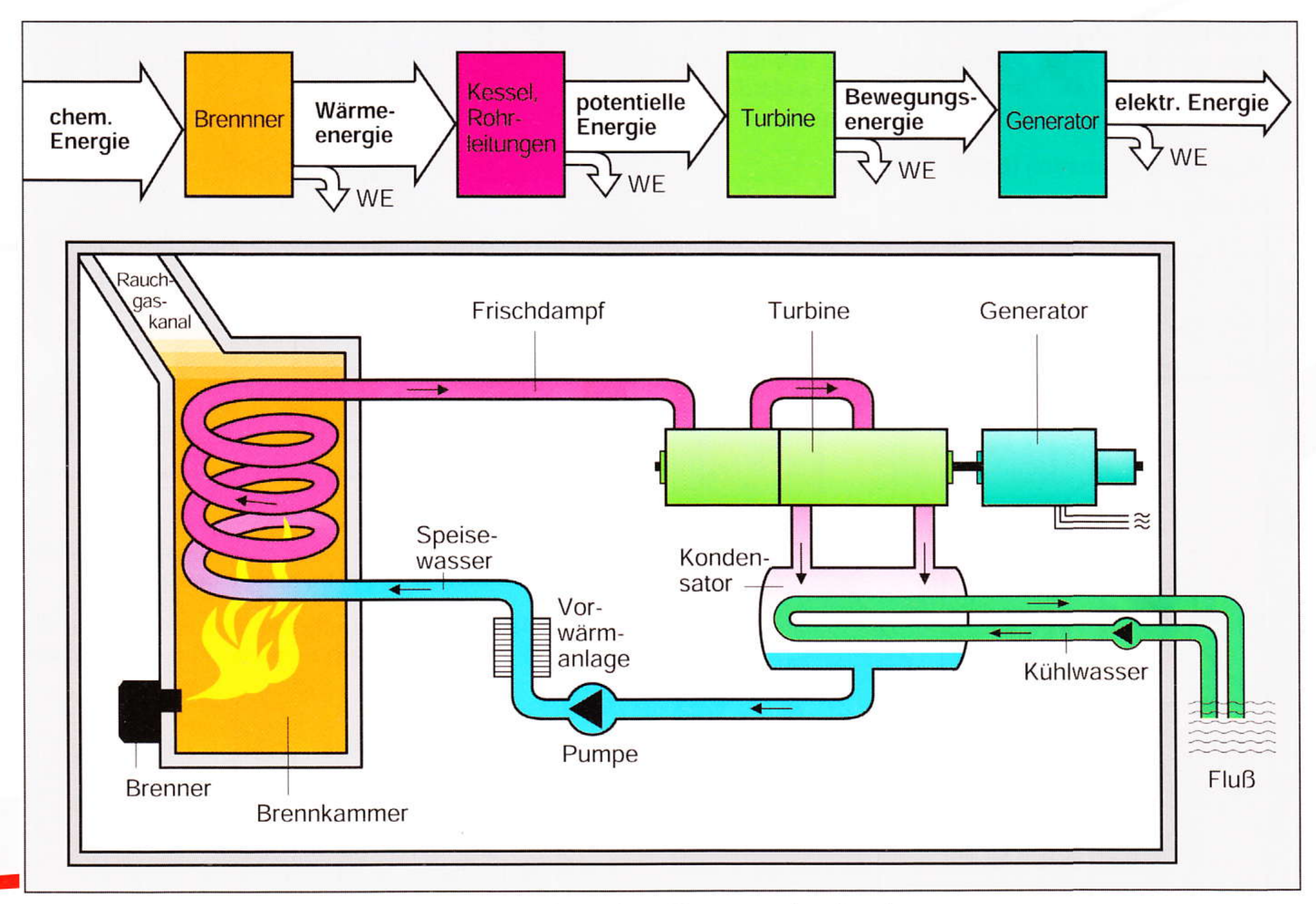


Abb. 3.1: Energieumwandlungen bei einem Kohlekraftwerk (WE: Wärmeenergieverluste)

- Im Brenner wird die zu Staub zermahlene Kohle verbrannt und dabei die chemische Energie der Kohle in Wärmeenergie umgewandelt.

- Im Kessel führt die Wärme zum Verdampfen des Wassers. Da der Dampf unter hohem Druck gehalten wird, ist die Wärmeenergie in potenzielle Energie des hochgespannten Dampfes umgewandelt worden.

- Lässt man den hochgespannten Dampf aus den Düsen gegen die Schaufeln der Dampfturbine strömen, wandelt sich die potenzielle Energie in Bewegungsenergie um.

- Die letzte Energieumwandlung findet im Generator statt, der an die Dampfturbine gekoppelt ist. Bewegungsenergie wird in elektrische Energie umgewandelt.

Bei fast jeder Umwandlungsstufe wird Wärmeenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Diese Verluste führen dazu, dass der Gesamtwirkungsgrad von Kohlekraftwerken heute bei etwa 0,38 liegt.

In Kernkraftwerken finden ebenfalls vier Energieumwandlungen statt (Abb. 3.2). Dabei ist lediglich die erste Energieumwandlung anders als in Kohlekraftwerken. In den Brennelementen werden die Kerne bestimmter Uranatome gespalten, wodurch sich die Brennelemente erhitzen. Es findet also eine Umwandlung von Kernenergie in Wärmeenergie statt. Alle anderen Energieumwandlungsstufen stimmen mit denen der Kohlekraftwerke überein. Der Gesamtwirkungsgrad eines Kernkraftwerkes beträgt etwa 0,34.

3.3 Beschreibung der Wärme im Teilchenmodell

Sowohl bei Kohlekraftwerken als auch bei Kernkraftwerken wird durch eine erste Energieumwandlung Wärme erzeugt. Damit lässt sich die Temperatur des Wassers erhöhen und Wasserdampf erzeugen. Diese Vorgänge können mit dem Teilchenmodell genauer beschrieben werden:

- Alle festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe sind aus kleinsten Teilchen aufgebaut. Es können Moleküle, Atome oder Ionen sein. Wasser besteht z. B. aus Wassermolekülen, Eisen aus Eisenatomen und Kochsalz aus Natrium- und Chloridionen.

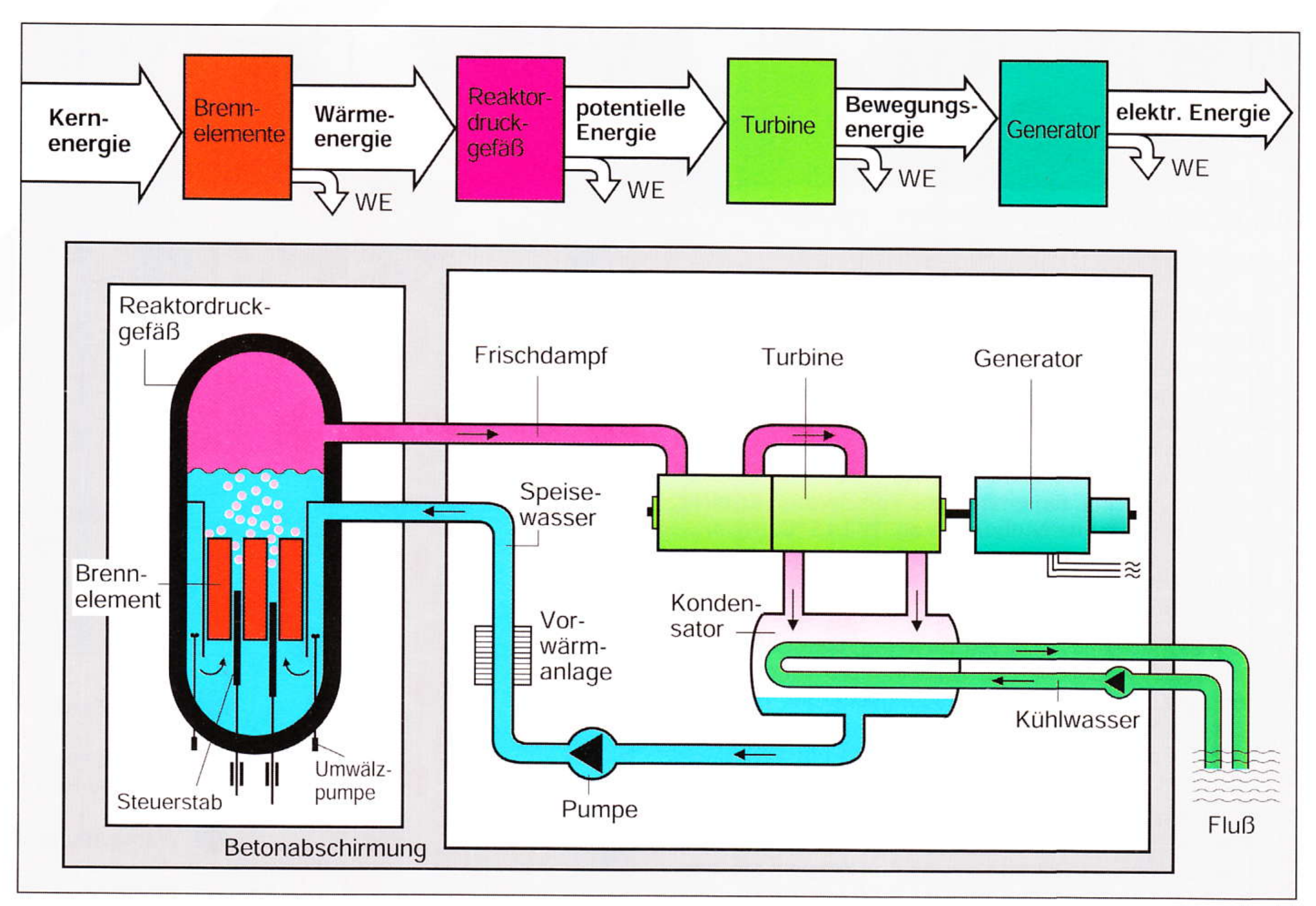


Abb. 3.2: Energieumwandlungen bei einem Kernkraftwerk (hier mit Siedewasserreaktor)

Abb. 3.3: Teilchenmodell eines festen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen

- Oberhalb des absoluten Nullpunktes (-273,15 °C) befinden sich die Teilchen in dauernder ungeordneter Bewegung. Je heftiger sich die Teilchen bewegen (je größer ihre mittlere Geschwindigkeit ist), desto höher ist die Temperatur des Stoffes. Bei festen Stoffen führen die Teilchen Schwingungen um ihre Position im Kristallgitter aus (siehe Abb. 3.3). Kommen die Teilchen zur Ruhe, ist die tiefstmögliche Temperatur erreicht. Das ist der absolute Nullpunkt von -273,15 °C.

- Die Geschwindigkeit der Teilchen kann auf zweierlei Weise erhöht werden:
  - Durch mechanische Arbeit (Reibung) steigt die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. Die mechanische Energie ist dann in Bewegungsenergie der Teilchen umgewandelt worden. Die Energie, die in Form der Teilchenbewegung vorliegt, wird innere Energie genannt.
  - Ein Körper höherer Temperatur hat Kontakt mit einem Körper niedrigerer Temperatur. Es stoßen dann die schnelleren Teilchen des heißen Körpers die langsameren Teilchen des kälteren Körpers an. Dadurch werden die schnelleren Teilchen langsamer und die langsamen Teilchen schneller. Die innere Energie des einen Körpers wird dabei erniedrigt und die des anderen Körpers erhöht.

Bei einem Kohlekraftwerk sind die heißen Verbrennungsgase in Kontakt mit den kälteren Rohrleitungen des Kessels und diese wiederum in Kontakt mit dem Wasser. Die Energieübertragung erfolgt von den schnelleren Gasteilchen zu den langsameren Eisen- bzw. Wasserteilchen. Besitzen die Wasserteilchen eine genügend große Geschwindigkeit, können sie die Flüssigkeit verlassen, d. h. Wasser verdampft.

Bei einem Kernkraftwerk werden Kerne des Uran-235 gespalten. Die Spaltprodukte fliegen mit großer Geschwindigkeit auseinander und versetzen die umgebenden UO_2-Moleküle in heftigere Schwingungen. Die Temperatur steigt daraufhin bis auf etwa 800 °C an. Die Bewegungsenergie der UO_2-Moleküle wird dann durch Stöße auf die Atome der Brennstabhülle und letztlich auf die Wassermoleküle übertragen (Abb. 3.4). Daraufhin steigt die Wassertemperatur an, und es entsteht Dampf.

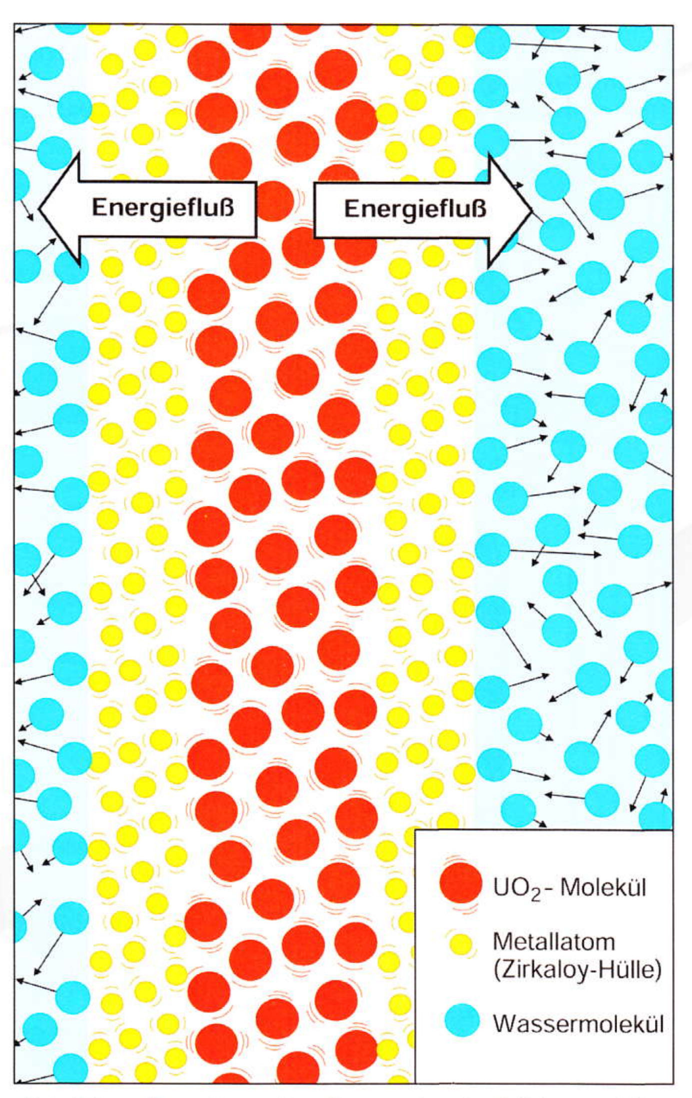


Abb. 3.4: Darstellung eines Brennstabes im Teilchenmodell

3.4 Energieeinheit Elektronvolt

Als Energieeinheiten werden das Newtonmeter (Nm), das Joule (J) und die Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei gilt:

$$1\ \text{Nm} = 1\ \text{J} = 1\ \text{Ws}$$

- 1 Nm Energie ist erforderlich, wenn eine Kraft von 1 N längs eines Weges von 1 m wirken soll.
- Bei 1 V Spannung und einer Stromstärke von 1 A wird in 1 s die Energie von 1 Ws z. B. in Wärme umgewandelt.

Bei einzelnen Kernumwandlungen treten sehr viel kleinere Energiewerte auf. Deshalb ist zusätzlich die Einheit Elektronvolt (eV) festgelegt worden. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird (Abb. 3.5).

Vielfache von 1 eV:

1 Kiloelektronvolt (keV) $= 10^3$ eV,
1 Megaelektronvolt (MeV) $= 10^6$ eV,
1 Gigaelektronvolt (GeV) $= 10^9$ eV.

Für Umrechnungen gilt:

$$1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$
$$1\ \text{J} = 6{,}242 \cdot 10^{18}\ \text{eV}$$

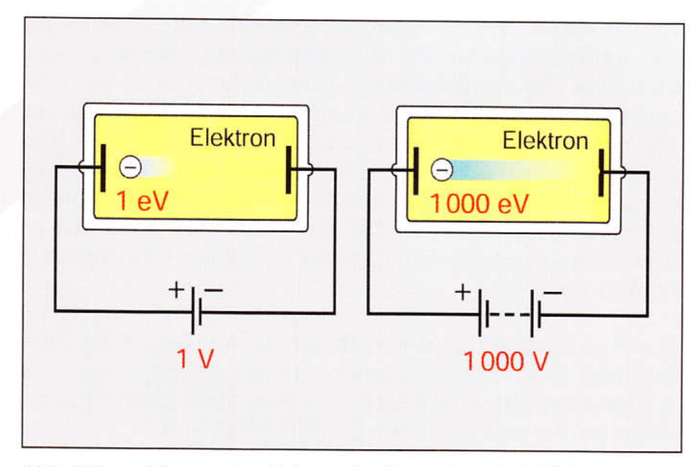


Abb. 3.5: Veranschaulichung der Energieeinheit Elektronvolt

3.5 Energie der Teilchenstrahlung

3.5.1 Alphateilchen

Die von einem radioaktiven Atomkern ausgesandten Alphateilchen besitzen alle dieselbe Energie oder beim Zerfall in mehrere Gruppen unterschiedliche Energien. Die Alphateilchen einer Gruppe haben aber immer dieselbe Energie. Beispiel für einen Gruppenzerfall:

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow\ ^{4}_{2}\text{He} +\ ^{222}_{86}\text{Rn} + \gamma \quad (5{,}7\ \%)$$

4,60 MeV 0,186 MeV

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow\ ^{4}_{2}\text{He} +\ ^{222}_{86}\text{Rn} \quad (94\ \%)$$

4,78 MeV

Hat das ausgesandte Alphateilchen die Maximalenergie erhalten, ist der Kern in den Grundzustand übergegangen. Ist die Energie des Alphateilchens kleiner, befindet sich der Kern noch in einem angeregten Zustand (metastabil). Die restliche Energie des angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben.

Die Tab. 3-1 zeigt Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide:

Radionuklid	Energie der Alphateilchen in MeV in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit
Rn-222	5,48952; ....
Ra-226	4,78438; 4,6017; ....
U-238	4,197; ....
Pu-239	5,157; 5,144; ....

Tab. 3-1: Beispiele für Energien der Alphateilchen einiger Alphazerfälle
(Die Punkte hinter den Energiewerten weisen auf weitere Alphateilchen hin, die mit geringerer Häufigkeit auftreten.)

3.5.2 Betateilchen

Die beim Betazerfall auftretenden Elektronen und Positronen besitzen alle unterschiedliche Energien. Sie können zwischen Null und einem Maximalwert liegen, wobei die größte Häufigkeit für jedes Radionuklid bei einem bestimmten Energiewert liegt (Abb. 3.6).

Die kontinuierliche Energieverteilung rührt daher, dass beim Betazerfall außer dem Elektron ein Antineutrino bzw. außer dem Positron ein Neutrino entsteht (ν griechischer Buchstabe „nü“).

Beta$^-$-Zerfall: $$^{1}_{0}\text{n} \rightarrow\ ^{1}_{1}\text{p} +\ ^{0}_{-1}\text{e} +\ ^{0}_{0}\bar{\nu}_e$$

Beta$^+$-Zerfall: $$^{1}_{1}\text{p} \rightarrow\ ^{1}_{0}\text{n} +\ ^{0}_{+1}\text{e} +\ ^{0}_{0}\nu_e$$

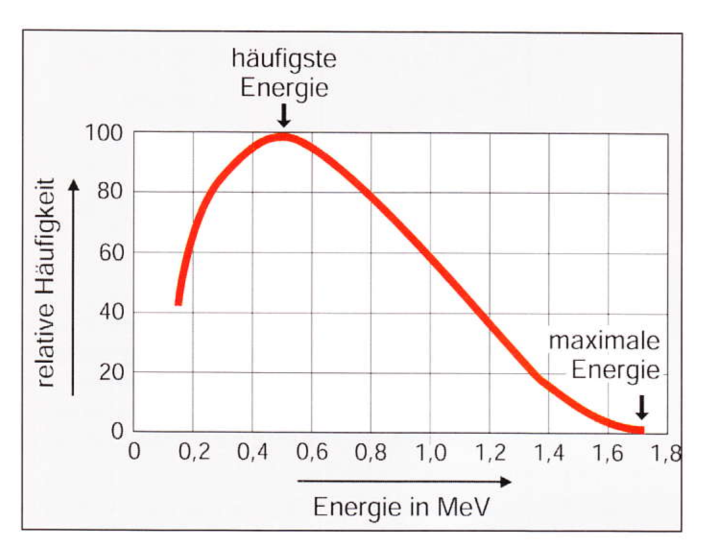


Abb. 3.6: Energieverteilung beim Beta⁻-Zerfall des P-32

Neutrinos und Antineutrinos besitzen keine Ruhemasse und keine Ladung. Sie stellen also eine Portion besonderer Energie dar. Da sie kaum mit Materie wechselwirken, besitzen sie ein außerordentlich hohes Durchdringungsvermögen und lassen sich deshalb nur schwer nachweisen.

Die frei werdende Zerfallsenergie verteilt sich dann nach Zufall in beliebigen Bruchteilen der Maximalenergie auf die beiden Elementarteilchen. Wird durch Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino nicht die gesamte Zerfallsenergie verbraucht, entstehen zusätzlich noch ein Gammaquant oder mehrere Gammaquanten.

Die Tab. 3-2 gibt Beispiele für die maximale Energie von Beta-Teilchen einiger Radionuklide. In Kernreaktionsgleichungen und Tabellen (Tab. 3-2) wird nur die Maximalenergie angegeben. Beispiel:

$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{32}_{16}S$$

1,7 MeV

Radionuklid	Maximalenergie von Beta⁻-Teilchen in MeV, in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit
H-3	0,02
Co-60	0,3; 1,5
Pb-210	0,02; 0,06
Bi-214	1,5; 3,3; ....

Tab. 3-2: Maximale Beta⁻-Energie einiger Radionuklide

3.5.3 Neutronen

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder ihre Energie liegt zwischen fast Null und einem Höchstwert.

Die bei Kernspaltungen entstehenden Neutronen besitzen eine kontinuierliche Energieverteilung. Ihre mittlere Energie beträgt etwa 1,5 MeV. Zur Spaltung weiterer Kerne des Uran-235 werden aber Neutronen mit einer Energie von etwa 0,025 eV benötigt. Das entspricht etwa einer Geschwindigkeit von 2 200 m/s. Die Tab. 3-3 gibt die Neutronengeschwindigkeiten für verschiedene Neutronenenergien an.

Energie in eV	100 000	100	0,1	0,025
Geschwindigkeit in m/s	$4{,}4 \cdot 10^6$	$1{,}4 \cdot 10^5$	$4{,}4 \cdot 10^3$	$2{,}2 \cdot 10^3$

Tab. 3-3: Energie und Geschwindigkeit von Neutronen

3.6 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen

Alphateilchen, Betateilchen, Protonen und Neutronen, die bei Kernumwandlungen ausgeschleudert werden, ergeben eine Teilchenstrahlung. Ausgeschleuderte Gammaquanten bilden eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Sie hat dieselbe Natur wie z. B. die Rundfunkwellen, das sichtbare Licht oder die Röntgenstrahlen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen beträgt im Vakuum c_0 = 299 792 458 m/s ≈ 300 000 km/s. Sie ist unabhängig von der Energie der einzelnen Gammaquanten (Photonen).

Die Energie eines einzelnen Quants ist nur von seiner Wellenlänge bzw. seiner Frequenz abhängig. Je kleiner die Wellenlänge (bzw. je größer die Frequenz) eines Quants, desto größer ist auch seine Energie (Abb. 3.7).

Die Abb. 3.8 zeigt, dass die Energie der Gammaquanten bis zu 10^7-mal so groß sein kann wie die Energie der Lichtquanten.

Gammaquanten werden u. a. nach einem Alpha- oder Betazerfall von einem Kern abgestrahlt, wenn dieser noch überschüssige Energie besitzt. Das kann in einer oder in mehreren Stufen geschehen. Die Quanten einer bestimmten Stufe haben alle dieselbe Energie. Die Anzahl der ausgesandten Quanten kann also größer sein als die Anzahl der umgewandelten Atomkerne. Die Tab. 3-4 gibt Beispiele für die Energie von Gammaquanten einiger Radionuklide: